



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

## **DESCRIÇÃO DA SECAGEM CONVECTIVA DE GRÃOS DE MILHO ATRAVÉS DE MODELOS DIFUSIVOS**

**AUTOR: Fabrício Batista Borges**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva**

Campina Grande-PB

Setembro/2016



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

## **DESCRIÇÃO DA SECAGEM CONVECTIVA DE GRÃOS DE MILHO ATRAVÉS DE MODELOS DIFUSIVOS**

Tese de Doutorado submetida à Coordenação do Curso de Doutorado em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

**AUTOR: Fabrício Batista Borges**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva**

Campina Grande-PB

Setembro/2016

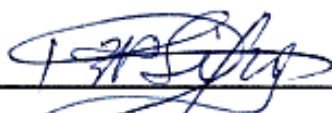
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- B732d      Borges, Fabrício Batista.  
              Descrição da secagem convectiva de grãos de milho através de modelos difusivos / Fabrício Batista Borges. – Campina Grande, 2016.  
              147 f. : il. color.
- Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.  
              "Orientação: Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva".  
              Referências.
1. Engenharia de Processos – Desenvolvimento. 2. Secagem Convectiva – Milho. 3. Difusão Líquida 4. Soluções Analíticas e Numéricas. 5. Variações Dimensionais. I. Silva, Wilton Pereira da. II. Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande (PB). III. Título.

CDU 620.11(043)

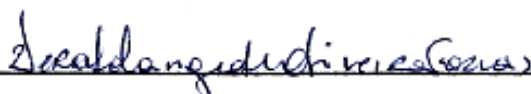
MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE **FABRÍCIO BATISTA BORGES** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

Tese de Doutorado aprovada em 23 de setembro de 2016



Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva

UAF/CCT/UFCG – Orientador



Prof.ª Dr.ª Vera Solange de Oliveira Farias

UAFM/CES/UFCG – Examinadora interna



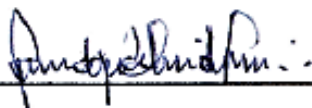
Prof.ª Dr.ª Cleide Maria Diniz Pereira da Silva e Silva

UAF/CCT/UFCG – Examinadora externa



Prof. Dr. Marcos Antônio Amaral Lins

UAF/CCT/UFCG – Examinador externo



Prof. Dr. Fernando José de A. Gama

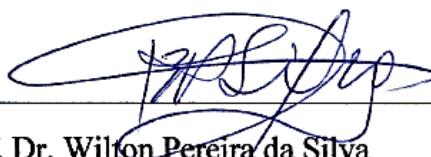
Faculdade Maurício de Nassau – Examinador externo



Prof.ª Dr.ª Hofsky Vieira Alexandre

PDI/CAPES/EMEPA – Examinadora externa

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, defendida por Fabrício Batista Borges e aprovada pela banca examinadora em 23 de setembro de 2016.



Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva

UAF/CCT/UFCG – Orientador

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho:

A Deus por me guiar, iluminar e me dar tranquilidade para seguir em frente com os meus objetivos e não desanimar com as dificuldades, estendendo sua mão nos momentos em que tudo parecia não ter solução e esteve ao meu lado sempre.

Aos meus queridos pais, José Borges Pereira de Lira Neto e Marleide Batista da Silva, pelo apoio durante toda minha trajetória de vida, sempre me incentivando na busca do conhecimento.

À mulher da minha vida, Tamara Nóbrega Amorim Borges, pelo apoio incondicional em todos os momentos, principalmente nos de incerteza, muito comuns para quem tenta trilhar novos desafios.

Aos meus filhos, Gabriel e Maria Clara, crianças que transbordam alegria e vivem intensamente as curiosas descobertas da infância, me inspiraram e me estimularam nos momentos difíceis da elaboração deste audacioso trabalho.

À minha valorosa sogra e segunda mãe, Mércia Marísia, pelos conselhos agradáveis que me incentivaram e acresceram consideravelmente minha autoestima.

Ao meu avô, Antônio Rodrigues Batista (*in memoriam*), grande exemplo de ser humano, pela sua simplicidade, honestidade, perseverança e humildade, homem laborioso que mostrou, através de pequenos gestos de fraternidade, dedicação, respeito e amor ao próximo, acreditando no crescimento das pessoas e num mundo melhor.

À minha família, em especial aos meus irmãos, Wagner, Fabiana, Políton (primo irmão), Fidel, Fábio, Francisco, Josélia e Josenilsom, pelo estímulo e incentivo.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor e orientador Dr. Wilton Pereira da Silva, pela preciosa orientação, que confiou, acreditou e investiu seu valioso tempo e conhecimento em mim, num momento em que estava com grande dificuldade, surgindo no momento certo como um verdadeiro professor, sendo amigo, paciente, tolerante, compreensivo e crítico nas horas em que estive ausente por causa das minhas dificuldades e limitações.

Aos membros da banca examinadora, os professores doutores Wilton Pereira da Silva, Cleide Maria Diniz Pereira da Silva e Silva, Vera Solange de Oliveira Farias, Hofsky Vieira Alexandre, Fernando José de Almeida Gama e Marcos Antônio Amaral Lins por disponibilizarem seu valioso tempo para a avaliação deste trabalho, contribuindo significativamente para melhoria do mesmo.

Aos meus queridos professores Wilton Pereira da Silva (Introdução ao Visual Fortran, Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional I), Antônio Gilson Barbosa de Lima (Termodinâmica e Fenômenos de Transporte), Marcos José de Almeida Gama (Matemática Aplicada à Engenharia de Processos), Mário Eduardo R. M. Cavalcanti da Mata (Secagem de Produtos Agroindustriais), Osvaldo Soares da Silva (Secagem por Atomização), John Kennedy Guedes Rodrigues (Método Superpave), Alexandre José de Melo Queiroz (Seminário I).

À Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, especialmente à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, pela oportunidade proporcionada.

Ao coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, professor Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto, e ao Professor Wilton Pereira da Silva que aceitou ser meu orientador, neste trabalho, pelo apoio, atenção e pelas palavras de incentivo que não me deixaram desaminar nunca.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente me incentivaram, pois com elas aprendi a lapidar a pedra bruta da vida e retirar da mesma a excelência para vencer os obstáculos, tornando mais especial a realização deste desafio.

“Não confunda derrotas com fracasso nem vitórias com sucesso. Na vida de um vencedor sempre haverá algumas derrotas, assim como na vida de um perdedor sempre haverá vitórias. A diferença é que, enquanto os vencedores crescem nas derrotas, os perdedores se acomodam nas vitórias. ”

**Roberto Shinyashiki**



# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xvii</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>xix</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xxiii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xxiv</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Justificativa.....	3
1.2 Objetivo geral .....	4
1.3 Objetivos específicos.....	4
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
2.1 A cultura do milho e a importância socioeconômica .....	6
2.1.1 Uso do milho na alimentação .....	11
2.1.2 Composição química e estrutura anatômica do grão de milho .....	12
2.1.3 Classificação do milho quanto ao tipo de grão .....	14
2.1.4 Qualidade do grão.....	15
2.2 Secagem.....	16
2.3 Modalidades de secagem .....	21
2.3.1 Secagem natural.....	22
2.3.2 Secagem artificial .....	23
2.3.2.1 Secagem contínua .....	24
2.3.2.2 Secagem intermitente .....	25
2.3.2.3 Via radiação eletromagnética .....	25

2.4	Teorias de secagem.....	25
2.4.1	Teoria da capilaridade .....	26
2.4.2	Teoria da difusão líquida .....	26
2.4.3	Teoria da condensação – evaporação .....	27
2.4.4	Teoria de Krischer .....	27
2.4.5	Teoria de Luikov .....	28
2.4.6	Teoria de Phillip – De Vries .....	28
2.5	Secadores .....	29
2.6	Efeito do encolhimento na secagem .....	31
2.7	Cinética de secagem .....	32
2.7.1	Modelagem matemática de secagem .....	33
2.8	Equação de transporte.....	36
2.9	Equação de difusão .....	36
2.10	Solução analítica baseado em modelos difusivos .....	37
2.10.1	Soluções analíticas para a equação de difusão em coordenadas cartesianas .....	38
2.11	Método numérico para solução da equação de difusão .....	39
2.11.1	Método dos Elementos Finitos (MEF) .....	40
2.11.2	Método das Diferenças Finitas (MDF) .....	41
2.11.3	Método dos Volumes Finitos (MVF) .....	42
2.11.4	Formulações para os métodos numéricos .....	43
2.12	Linguagem de programação Fortran.....	45
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>47</b>
3.1	Solução analítica para sólidos com formato de paralelepípedo.....	47
3.2	Solução analítica tridimensional para condição de contorno do terceiro tipo .....	48
3.3	Otimizador para condição de contorno prescrita (primeiro tipo) .....	52
3.4	Otimizador para condição de contorno convectiva (terceiro tipo) .....	53
3.4.1	Verificação do número de termos usados na série .....	55
3.5	Solução numérica para sólido com formato de paralelepípedo.....	56
3.5.1	Solução numérica tridimensional em coordenadas cartesianas .....	56

3.5.2	Discretização para volumes de controle internos .....	57
3.5.3	Discretização para o volume de controle oeste-norte-atrás .....	60
3.5.4	Emprego da simetria para o paralelepípedo .....	63
3.5.5	Discretização para o volume de controle oeste-sul-atrás, considerando os fluxos ( $h_w = h_s = h_b = 0$ ). .....	63
3.5.6	Parâmetro $D_{ef}$ .....	66
3.5.7	Valor médio do teor de umidade ( $\bar{M}$ ) para uma solução numérica .....	67
3.6	<i>Software</i> desenvolvido.....	68
3.6.1	Algoritmo para simulação dos processos difusivos.....	68
3.6.2	Otimizador utilizado para estimar os parâmetros de processos.....	68
3.7	Matéria prima e experimentos realizados .....	69
3.7.1	Matéria prima .....	69
3.7.2	Procedimentos experimentais .....	70
3.7.2.1	Secador utilizado nos experimentos .....	72
3.7.2.2	Teor de umidade dos grãos .....	74
3.7.2.3	Cálculo do teor de umidade .....	75
3.7.3	Modelos empíricos empregados para descrever a secagem .....	77
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	78
4.1	Descrição da cinética de secagem utilizando modelos empíricos.....	78
4.2	Indicadores e parâmetros de ajuste estatístico das equações empíricas .....	79
4.2.1	Análise dos resultados dos modelos empíricos .....	87
4.3	Validação do software desenvolvido .....	90
4.3.1	Validação do software através de soluções analíticas .....	91
4.3.2	Validação através de teste de consistência .....	92
4.4	Modelos analíticos de difusão para descrever a cinética de secagem .....	95
4.4.1	Cinética de secagem para a condição de contorno prescrita (primeiro tipo).....	96
4.4.2	Cinética de secagem para condição de contorno convectiva (terceiro tipo).....	99
4.5	Considerações sobre os modelos numéricos e analíticos .....	103
4.5.1	Resultados do modelo numérico.....	103

<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>110</b>
5.1	Modelos empíricos utilizados para descrever a cinética de secagem.....	110
5.2	Validação do programa computacional desenvolvido.....	111
5.3	Modelos difusivos com solução analítica.....	112
5.4	Modelo difusivo com solução numérica.....	113
5.5	Sugestão para trabalhos futuros.....	114
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>115</b>
	<b>APÊNDICE A – RESULTADOS DOS DADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>136</b>
A.1.	Condições sob as quais foram realizados a secagem dos grãos de milho .....	136
A.2.	Dimensões, teor de umidade e tempo de secagem .....	137
A.3.	Dados experimentais da cinética de secagem dos grãos de milho.....	138
A.4.	Taxa da variação de massa em função do tempo.....	142
A.5.	Evolução das dimensões em função do tempo .....	144

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Comparativo de produção e consumo mundial de milho.....	8
Figura 2.2 – Produção de milho – Brasil 2014/15.....	10
Figura 2.3 – Estrutura anatômica do grão de milho. ....	12
Figura 2.4 – Tipos de milho e as relativas proporções do endosperma farináceo e vítreo.....	14
Figura 2.5 – Classificação das modalidades de secagem de grãos.....	21
Figura 2.6 – Formulações de interpolação no tempo (Adaptado de MALISKA, 2004). ....	44
Figura 3.1 – Paralelepípedo destacando em um plano vertical xy, na posição $z = 0$ , onde a distribuição de água foi examinada.....	48
Figura 3.2 – Malha tridimensional com 27 tipos distintos de volumes de controle.....	56
Figura 3.3 – Volume de controle interno de ponto nodal P e seus vizinhos. ....	57
Figura 3.4 – Volume de controle oeste (W) - norte (N) - atrás (B). ....	60
Figura 3.5 – Condição de simetria para o paralelepípedo: (a) Destaque para 1/8 do paralelepípedo; (b) Parte destacada.....	63
Figura 3.6 – Volume de controle oeste (W) - sul (S) - atrás (B). ....	64
Figura 3.7 – Amostra da plantação do milho, utilizada no experimento.....	69
Figura 3.8 – Grãos de milho utilizado nos experimentos. ....	70
Figura 3.9 – Grãos de milho no cesto de tela fina de alumínio. ....	70
Figura 3.10 – Grãos de milho no cesto de tela fina de alumínio para encolhimento. ....	71
Figura 3.11 – Paquímetro digital utilizado nos experimentos. ....	71
Figura 3.12 – Balança digital utilizada nos experimentos.....	72
Figura 3.13 – Anemômetro de palheta utilizado para medir a velocidade do ar quente. ....	72
Figura 3.14 – Secador utilizado nos experimentos de secagem dos grãos de milho.....	73
Figura 3.15 – Esquema do secador convectivo usado nos experimentos de secagem. ....	73

Figura 3.16 – Estufa utilizada no experimento: (a) Vista frontal; (b) Interior da estufa. ....	74
Figura 3.17 – Dessecador utilizado no experimento. ....	75
Figura 4.1 – Simulações de secagem usando o modelo 1 (Page) para as temperaturas: (a) $T = 45^{\circ}\text{C}$ ; (b) $T = 55^{\circ}\text{C}$ ; (c) $T = 65^{\circ}\text{C}$ e (d) $T = 75^{\circ}\text{C}$ .....	81
Figura 4.2 – Simulações de secagem usando o modelo 2 (Silva et alii) para as temperaturas: (a) $T = 45^{\circ}\text{C}$ ; (b) $T = 55^{\circ}\text{C}$ ; (c) $T = 65^{\circ}\text{C}$ e (d) $T = 75^{\circ}\text{C}$ .....	82
Figura 4.3 – Simulações de secagem usando o modelo 3 (Peleg) para as temperaturas: (a) $T = 45^{\circ}\text{C}$ ; (b) $T = 55^{\circ}\text{C}$ ; (c) $T = 65^{\circ}\text{C}$ e (d) $T = 75^{\circ}\text{C}$ .....	83
Figura 4.4 – Simulações de secagem usando o modelo 4 (Wang e Singh) para as temperaturas: (a) $T = 45^{\circ}\text{C}$ ; (b) $T = 55^{\circ}\text{C}$ ; (c) $T = 65^{\circ}\text{C}$ e (d) $T = 75^{\circ}\text{C}$ .....	84
Figura 4.5 – Simulações de secagem usando o modelo 5 (Lewis) para as temperaturas: (a) $T = 45^{\circ}\text{C}$ ; (b) $T = 55^{\circ}\text{C}$ ; (c) $T = 65^{\circ}\text{C}$ e (d) $T = 75^{\circ}\text{C}$ .....	85
Figura 4.6 – Simulações de secagem usando o modelo 6 (Henderson e Pabis) para as temperaturas: (a) $T = 45^{\circ}\text{C}$ ; (b) $T = 55^{\circ}\text{C}$ ; (c) $T = 65^{\circ}\text{C}$ e (d) $T = 75^{\circ}\text{C}$ .....	86
Figura 4.7 – Simulações de secagem usando os modelos 1 (Page) e 2 (Silva et alii) para as temperaturas: (a) $T = 45^{\circ}\text{C}$ ; (b) $T = 55^{\circ}\text{C}$ ; (c) $T = 65^{\circ}\text{C}$ e (d) $T = 75^{\circ}\text{C}$ .....	88
Figura 4.8 – Simulação da cinética de secagem usando o modelo 1 (Page) para as todas as temperaturas estudadas. ....	89
Figura 4.9 – Simulação das cinéticas de secagem de placas de argila usando: (a) “ <i>Convective Adsorption – Desorption</i> ” e (b) Programa desenvolvido (tridimensional).....	92
Figura 4.10 – Sobreposição de curvas entre os gráficos da solução analítica e da solução obtida pelo programa desenvolvido. ....	92

Figura 4.11 – Geometria (sem escala) em forma de paralelepípedo envolvendo uma malha 7 x 3 x 3 utilizada para testar a consistência do código computacional desenvolvido. ....	93
Figura 4.12 – Perfis de teor de água nos volumes de controle listados na Tabela 4.9: (a) oeste, sul, atrás; (b) leste, sul, atrás; (c) leste, sul, frente e (d) oeste, sul, frente. ....	94
Figura 4.13 – Superposição dos transientes do teor de água para volumes de controle localizados nos vértices inferiores do paralelepípedo.....	95
Figura 4.14 – Simulações de secagem para razão de umidade usando a condição de contorno do primeiro tipo para as temperaturas: (a) T = 45°C; (b) T = 55°C; (c) T = 65°C e (d) T = 75°C.....	97
Figura 4.15 – Simulações de secagem para o teor de umidade em base seca usando a condição de contorno do primeiro tipo para as temperaturas: (a) T = 45°C; (b) T = 55°C; (c) T = 65°C e (d) T = 75°C. ....	98
Figura 4.16 – Simulações de secagem para a razão de umidade usando a condição de contorno do terceiro tipo para as temperaturas: (a) T = 45°C; (b) T = 55°C; (c) T = 65°C e (d) T = 75°C.....	101
Figura 4.17 – Simulações de secagem para o teor de umidade em base seca usando a condição de contorno do terceiro tipo para as temperaturas: (a) T = 45°C; (b) T = 55°C; (c) T = 65°C e (d) T = 75°C. ....	102
Figura 4.18 – Simulações da cinética de secagens usando o modelo numérico para as temperaturas: (a) T = 45°C; (b) T = 55°C; (c) T = 65°C e (d) T = 75°C.....	105
Figura 4.19 – Distribuição de umidade para o experimento de secagem das amostras de milho a 45°C para os instantes de tempo (em minutos) de: (a) 0; (b) 30; (c) 60; (d) 120; (e) 240; (f) 560. ....	108

Figura 4.20 – Distribuição de umidade para os experimentos de secagem no instante de tempo de 40 minutos para as temperaturas de: (a) 45°C; (b) 55°C; (c) 65°C; e (c) 75°C. .... 109



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Projeção da produção, do consumo e da exportação de milho. ....	9
Tabela 2.2 – Percentual do constituinte total indicado nas estruturas físicas do milho. ....	13
Tabela 2.3 – Equações empíricas utilizadas para prever a cinética de secagem. ....	35
Tabela 3.1 – Algumas raízes da equação característica para vários números de Biot. ....	54
Tabela 3.2 – Valores $\bar{M}^*(0)$ como função de $n$ para vários números de Biot.....	55
Tabela 3.3 – Modelos empíricos utilizados para descrever a cinética de secagem. ....	77
Tabela 4.1 – Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos grãos de milho descrito pelo modelo empírico 1 (Page). ....	79
Tabela 4.2 – Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos grãos de milho descrito pelo modelo empírico 2 (Silva et alii).....	80
Tabela 4.3 – Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos grãos de milho descrito pelo modelo empírico 3 (Peleg). ....	80
Tabela 4.4 – Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos grãos de milho descrito pelo modelo empírico 4 (Wang e Singh). ....	80
Tabela 4.5 – Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos grãos de milho descrito pelo modelo empírico 5 (Lewis). ....	80
Tabela 4.6 – Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos grãos de milho descrito pelo modelo empírico 6 (Henderson e Pabis). ....	80
Tabela 4.7 – Dados com o teor de umidade em base seca de placas de cerâmica vermelha utilizados para a simulação. ....	91
Tabela 4.8 – Dados de placas de cerâmica vermelha utilizados para a simulação. ....	93

Tabela 4.9 – Identificação dos volumes de controle localizados nos vértices inferiores da geometria em forma de paralelepípedo.....	94
Tabela 4.10 – Resultados da cinética de secagem da razão de umidade para o intervalo de 560 minutos.....	96
Tabela 4.11 – Resultados da cinética de secagem do teor de umidade em base seca para o intervalo de 560 minutos.....	96
Tabela 4.12 – Resultados da cinética de secagem da razão de umidade dos grãos de milho descrito pelo <i>software Convective</i> para o intervalo de tempo de 560 minutos.....	99
Tabela 4.13 – Dados experimentais da cinética de secagem dos grãos de milho utilizados na otimização usando a condição de contorno do terceiro tipo para intervalo de 560 minutos.....	99
Tabela 4.14 – Parâmetros de processos encontrados através da simulação usando o modelo numérico para as temperaturas: (a) $T = 45^{\circ}\text{C}$ , (b) $T = 55^{\circ}\text{C}$ , (c) $T = 65^{\circ}\text{C}$ e (d) $T = 75^{\circ}\text{C}$ .....	104

# NOMENCLATURA

## Letras latinas

$A_p, A_w, A_e, A_s, A_f, A_b$ – Coeficientes da equação de difusão discretizada .....	[–]
$A_{3n}$ – Coeficiente da solução analítica dependentes da posição (Condição de contorno do terceiro tipo) .....	[–]
$B_{3n}$ – Coeficiente da solução analítica para o teor de umidade médio (Condição de contorno do terceiro tipo) .....	[–]
$B$ – Termo independente de $\Phi$ na equação de difusão discretizada .....	[–]
$B_i$ – Número de Biot .....	[–]
$D$ – Difusividade.....	$[m^2 s^{-1}]$
$D_{ef}$ – Difusividade efetiva de massa do produto .....	$[m^2 s^{-1}]$
$D_o$ – Fator de Arrhenius .....	$[m^2 s^{-1}]$
$E$ – Espessura do produto em estudo .....	[m]
$h$ – Coeficiente de transferência de massa por convecção .....	$[m s^{-1}]$
$i, j, k$ – Índices para uma posição de pontos na malha .....	[–]
$k$ – Condutividade térmica .....	$[W m^{-1} K^{-1}]$
$L_x$ – Espessura do paralelepípedo .....	[m]
$L_y$ – Largura do paralelepípedo .....	[m]
$L_z$ – Comprimento do paralelepípedo .....	[m]
$m$ – Massa do corpo em estudo .....	[kg]
$m_{eq}$ – Massa de equilíbrio .....	[kg]
$m_s$ – Massa seca .....	[kg]
$M$ – Teor de umidade numa dada posição de um corpo .....	$[kg kg^{-1}]$
$\bar{M}$ – Teor de umidade médio (base seca) .....	$[kg kg^{-1}]$

$M_o$ – Teor de umidade inicial (base seca) .....	$[kg\ kg^{-1}]$
$M_{eq}$ – Teor de umidade de equilíbrio (base seca) .....	$[kg\ kg^{-1}]$
$\bar{M}(t)$ – Teor de umidade médio em um instante t (base seca) .....	$[kg\ kg^{-1}]$
$\bar{M}_i^{exp}$ – Teor de umidade médio do i-ésimo ponto experimental (base seca) .....	$[kg\ kg^{-1}]$
$\bar{M}_i^{ana}$ – Teor de umidade médio determinado pela solução analítica (base seca) .....	$[kg\ kg^{-1}]$
MR – Razão de umidade .....	$[-]$
N, S, E, W, F, B, P – Pontos nodais .....	$[-]$
$\vec{r}$ – Vetor posição no espaço .....	$[m]$
$R^2$ – Coeficiente de determinação (adimensional) .....	$[-]$
$\Delta S$ – Área elementar .....	$[m^2]$
S – Termo fonte da equação de difusão .....	$[-]$
$S^\Phi$ – Termo fonte da equação de transporte .....	$[-]$
t – Tempo .....	$[s]$
T – Temperatura .....	$[^\circ C]$
$\vec{v}$ – Velocidade do meio .....	$[ms^{-1}]$
$\Delta V$ – Volume elementar .....	$[m^3]$
$\Delta V'_{ij}$ – Volume do volume de controle .....	$[m^3]$
V – Volume .....	$[m^3]$
x, y, z – Coordenadas cartesianas .....	$[m]$

## Letras gregas

$\alpha$ – Difusividade térmica do produto .....	$[m^2 s^{-1}]$
$\Gamma^\Phi$ e $\lambda$ – Coeficientes de transporte .....	$[-]$
$\Delta$ – Variação .....	$[-]$
$\mu_n$ – Raízes da equação transcendental .....	$[-]$
$\rho$ – Densidade .....	$[kg m^{-3}]$
$1/\sigma_i$ – Peso estatístico do i-ésimo ponto experimental .....	$[-]$
$\Phi$ – Variável de transporte .....	$[-]$
$\bar{\Phi}$ – Valor médio da variável de transporte .....	$[-]$
$\Phi_{eq}$ – Variável de transporte de equilíbrio .....	$[-]$
$\Phi_i$ – Valor inicial da variável de transporte .....	$[-]$
$\Phi_\infty$ – Variável de transporte para um fluido ambiente .....	$[-]$
$\bar{\Phi}_i$ – Valor médio do i-ésimo ponto experimental .....	$[-]$
$\delta\Phi_i$ – Desvio do i-ésimo ponto experimental .....	$[-]$
$\Phi^{sim}$ – Valor simulado de $\Phi$ .....	$[-]$
$M_P, M_E, M_W, M_N, M_S$ – Variáveis dependentes na equação discretizada .....	$[-]$
$M_F, M_B$ – Variáveis dependentes na equação discretizada .....	$[-]$
$\dot{\phi}$ – Fluxo de $\Phi$ .....	$[-]$
$\phi^*$ – Fluxo de $\Phi$ por unidade de área .....	$[-]$
$\phi_w^*$ – Fluxo de $\Phi$ por unidade de área no contorno oeste .....	$[-]$
$\chi^2$ – Qui-quadrado .....	$[-]$
$\nabla$ - Operador Nabla .....	$[-]$

## Sobrescritos

0 – Tempo inicial

w – Face oeste do volume de controle

P – Nó do volume de controle em estudo

## **Subscritos**

ef – Efetiva

eq – Equilíbrio

e, w, n, s, f, b – Fronteiras de um volume de controle

i – Inicial

s – Seco

bs – Base seca

## RESUMO

Objetiva-se com este trabalho realizar estudos usando as soluções analítica e numérica da equação de difusão para descrever a secagem em camada fina de grãos de milho nas temperaturas de 45, 55, 65 e 75 °C, os quais têm uma forma que pode ser aproximada a de um paralelepípedo. Foram utilizadas ferramentas numéricas e analíticas para o estudo dos fenômenos difusivos envolvendo as três dimensões geométricas dos grãos mencionados. Para a solução numérica proposta, a equação de difusão tridimensional foi discretizada utilizando os métodos dos volumes finitos, com uma formulação totalmente implícita, fazendo uso das coordenadas cartesianas. Com a finalidade de estabelecer a correta condição de contorno na descrição da cinética de secagem dos grãos de milho, foram utilizados três *softwares* para a determinação dos parâmetros de processo a partir dos dados experimentais via otimização. O primeiro *software* usado para simular a cinética de secagem do milho foi “*Prescribed Adsorption – Desorption*” V.2.2, que utiliza a solução analítica da equação de difusão empregando a condição de contorno do primeiro tipo. O segundo *software* utilizado foi o “*Convective Adsorption – Desorption*” V. 2.4. Este simula a cinética de secagem de produtos usando a solução analítica da equação de difusão empregando a condição de contorno do terceiro tipo. Já o terceiro *software* usado na otimização foi o “*LS Optimizer*” V.2.1, que determina os parâmetros de uma equação diferencial usando o método dos mínimos quadrados na solução numérica da equação de difusão com a condição de contorno do terceiro tipo. Esses dois últimos geraram resultados coerentes e consistentes em todas as etapas efetuadas durante os testes. Pode-se concluir que o segundo e o terceiro modelos propostos para analisar os dados da pesquisa foram coerentes e equivalentes, e os resultados obtidos foram satisfatórios. Assim, a condição de contorno do terceiro tipo foi usada para a solução numérica tridimensional da equação de difusão em coordenadas cartesianas. Testes de validação indicaram que a solução numérica desenvolvida apresenta resultados coerentes com aqueles esperados.

**Palavras-chave:** Secagem convectiva, difusão líquida, soluções analíticas e numéricas, variações dimensionais

## ABSTRACT

The objective with this essay is to carry out studies using analytical and numerical solutions of the diffusion equation to describe the drying of thin layer of corn grains at temperatures of 45, 55, 65 and 75 ° C, which have a shape that can be approximated for a parallelepiped. Numerical and analytical tools were used for the study of the diffusive phenomena involving the three geometric dimensions of the mentioned grains. For the numerical solution proposed, the three-dimensional diffusion equation was discretized using the finite volume method with a fully implicit formulation using the cartesian coordinates. In order to establish the right boundary condition in the description of the corn grain drying kinetics, three software were used for the determination of the process parameters from the experimental data using optimization. The first software used to simulate corn drying kinetics was "Prescribed Adsorption - Desorption" V.2.2, which uses the analytical solution of the diffusion equation using the boundary condition of the first type. The second software used was "Convective Adsorption - Desorption" V. 2.4. This one simulates the kinetics of drying products using the analytical solution of the diffusion equation using the boundary condition of the third kind. The third software used in the optimization was the "LS Optimizer" V.2.1 which determines the parameters of a differential equation using the method of least squares in the numerical solution of the diffusion equation using the boundary condition of the third kind. The latter two have generated coherent and consistent results in all steps performed during testing. It can be concluded that the second and third proposed models to analyze the survey data were consistent and equivalent and the results were satisfactory. Thus, the boundary condition of the third kind was used for three-dimensional numerical solution of the diffusion equation in cartesian coordinates. Validation tests indicated that the developed numerical solution provides coherent results with those expected.

**Keywords:** convective drying, liquid diffusion, analytical and numerical solutions, dimensional variations



## **1 INTRODUÇÃO**

Na indústria de alimentos, uma das etapas importantes em vários processos produtivos, tanto do ponto de vista econômico quanto da qualidade dos mais variados produtos, consiste na secagem dos produtos agrícolas para as mais diferentes finalidades. É um processo que assegura a qualidade e a estabilidade considerando que a diminuição da quantidade de água do alimento, reduz a atividade biológica e as alterações químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento.

As operações de pós-colheita e pré-processamento de grãos são constituídas de etapas indispensáveis ao sistema de produção, tais como: transporte, recepção, pré-limpeza e limpeza, secagem e armazenamento. A secagem do produto proporciona a continuidade das suas características originais e o seu preparo para a armazenagem segura, garantindo a longevidade dessas características (LACERDA FILHO, 1998).

A importância do conhecimento e do controle de fatores como temperatura, velocidade de fluxo do ar e teor de umidade é indispensável nos processos de secagem de produtos agrícolas. De um modo geral, as operações de secagem apresentam custos elevados como a utilização de mão de obra, o tempo de secagem e, principalmente, o consumo de energia. Esses custos podem ser reduzidos de forma significativa se for realizado um estudo visando ao controle das propriedades envolvidas no processo. Entre as mais importantes, estão a temperatura e fluxo do ar de secagem.

O processo de secagem de um produto ocorre através da transferência simultânea de calor e massa por difusão da superfície para o interior do produto. Para descrever a transferência de umidade dentro do material e explicar os efeitos de certos parâmetros na sua cinética de secagem, é necessário que o transporte de umidade dentro de uma partícula individual do material, seja muito bem representado por um modelo matemático. Sendo assim torna-se necessário inserir ao máximo todos os efeitos dentro dos modelos matemáticos para tornar possível descrever com realismo o fenômeno físico, e aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos. Na literatura, verifica-se uma preferência pelos modelos de difusão líquida aplicados na sua maioria a produtos com formas bem conhecidas tais como: esferas, cilindros, paralelepípedos, podendo as condições de contorno na superfície do corpo ser de equilíbrio ou convectiva. Grande parte desses modelos se baseia na termodinâmica dos processos

irreversíveis, que propõem, que a água se move em meios capilares porosos, em condições isotérmicas, sob a ação de um gradiente de potencial de transferência de massa. Esse potencial de transferência de massa foi criado por Luikov (1975).

De acordo com Farias (2011), a remoção de água de um produto durante o processo de secagem convectiva ocorre por meio da transferência de calor ao produto por convecção, através do fluxo de ar aquecido. Esse calor é utilizado para vaporizar o líquido na superfície do sólido ou nas camadas mais próximas da superfície quando a mudança de estado ocorre no interior do corpo (BROOKER et al., 1992). O vapor produzido é retirado pelo fluxo de ar, seja através de convecção natural ou forçada. Com a retirada de água da superfície e das camadas mais externas, cria-se um gradiente de umidade no interior do produto causando um processo migratório de umidade das camadas mais centrais para as mais externas e daí para superfície (FIOREZE, 2004).

Diversos autores consideram que o transporte de água pode ocorrer na forma de líquido ou vapor ou de ambas as formas, dependendo de alguns fatores, tais como teor de umidade, temperatura e tipo do produto, enquanto outros consideram somente a difusão líquida (LIMA, 1999; LIMA e NEBRA, 2000a; NASCIMENTO, 2002).

Portanto, o estudo de secagem torna-se especialmente importante no caso de existirem poucas informações sobre o comportamento do material submetido às diferentes condições de secagem, pois permite o conhecimento da sua cinética e o ajuste de equações que poderão auxiliar no entendimento do fenômeno de transferência de massa.

## 1.1 Justificativa

Embora exista uma grande variedade de trabalhos sobre a secagem usando modelos difusivos, há uma carência de pesquisas sobre secagem de grãos de milho, na forma de paralelepípedo, usando soluções numéricas com difusividade variável. A utilização de modelos matemáticos que simulam a secagem de produtos que apresentam umidade em seu estado natural é uma das alternativas adotadas para melhorar a prática de secagem, permitindo diminuir os custos, a energia, o tempo e os defeitos provocados pelo processo de secagem.

A partir deste trabalho, pretende-se colocar à disposição de interessados, subsídios teóricos no tocante à transferência de massa nos processos de secagem de grãos de milho na forma de paralelepípedo, incluindo variações dimensionais, bem como propriedades termo físicas variáveis, o que ainda é pouco discutido pela comunidade científica para o grão de milho objeto deste estudo. Geralmente, lança-se mão de simplificações na descrição da cinética de secagem, reduzindo-se o modelo em estudo ao caso unidimensional e, não raro, os estudos referentes à secagem que envolvem apenas modelos analíticos, o que pressupõe, quase sempre, propriedades termo físicas constantes. Modelos que descrevem adequadamente os processos de transferência de massa servem de base para estudar processos industriais complexos, facilitar os ensaios experimentais e explicar os mecanismos físicos que estão envolvidos.

Com a carência de pesquisas em fenômenos tridimensionais transientes de difusão de massa, voltadas para sólidos porosos com a forma de paralelepípedo, focando parâmetros termo físicos variáveis, em particular na determinação de tais parâmetros através de conceitos de otimização, este trabalho contém aspectos inovadores, fornecendo novos subsídios com relação à descrição de secagem de grãos de milho com a geometria mencionada, incluindo o seu encolhimento.

Para tanto, deve-se ter uma compreensão mais aprofundada da Física envolvida no processo, com a necessidade da proposição de modelos que se aproximem da descrição do fenômeno via simulação de resultados experimentais. Sendo assim, este trabalho de pesquisa pretende contribuir na solução de problemas específicos focados em necessidades técnicas de processos relativos à pós-colheita e, possivelmente, viabilizar algumas inovações, bem como o desenvolvimento de um *software* visando à descrição de processo de secagem de produtos agrícolas.

## 1.2 Objetivo geral

Apresentar soluções analítica e numérica da equação de difusão com condições de contorno do terceiro tipo, incluindo a variação dos parâmetros de processo, assim como a consideração do encolhimento, para descrever a secagem de grãos de milho de variedade 1051 em camada fina.

## 1.3 Objetivos específicos

Visando o alcance do objetivo geral delineado, apresenta-se, neste estudo, os seguintes objetivos específicos.

- Descrever o processo de secagem usando modelos empíricos, para verificar aquele que melhor se ajusta aos dados experimentais;
- Determinar a condição de contorno apropriada para descrever o processo através de modelos de difusão;
- Desenvolver um *software* computacional, na plataforma *Windows*, para simular o processo de difusão de massa em corpos com a forma que se aproxima de paralelepípedo;
- Apresentar solução analítica e numérica em três dimensões para o problema de difusão transiente de massa, pressupondo condição de contorno do terceiro tipo em grãos de milho com a forma que se aproxima de paralelepípedo, baseando-se na teoria da difusão líquida;
- Modelar e examinar o efeito do fenômeno de difusão de massa em sólidos porosos na forma de paralelepípedo;
- Aplicar os modelos analíticos e numéricos desenvolvidos no estudo da secagem de grãos de milho;
- Comparar os resultados das simulações analíticas e numéricas com os resultados experimentais para os produtos selecionados e determinar os coeficientes de transferência de calor e massa: difusivo no interior, e convectivo na superfície do produto, para várias condições de secagem;

- Estudar os efeitos das considerações adotadas nos diversos modelos sobre os coeficientes de transporte;
- Obter correlações matemáticas para os coeficientes de difusão de massa e de transferência convectiva de calor, como função dos parâmetros de secagem e das dimensões do sólido;
- Ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem de grãos de milho e determinar, para a condição de contorno do terceiro tipo, o número de Biot para cada secagem.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre os métodos de secagem de produtos em geral, além do processo de secagem convectiva, por meio de soluções numéricas da equação de difusão tridimensional, em coordenadas retangulares, com condição de contorno do terceiro tipo, em sólidos porosos com a forma aproximada de um paralelepípedo.

### 2.1 A cultura do milho e a importância socioeconômica

O milho (*Zea mays* L.) é o segundo cereal em importância no mundo, após o trigo e seguido pelo arroz (LISBOA et al., 1999). Algumas vantagens conferidas à cultura do milho justificam a sua ampla distribuição, tais como: composição e valor nutritivo; alta produção por unidade de trabalho e unidade de área; fonte de nutrição de fácil transporte; pequenas perdas de grãos causadas por pássaros e chuvas; período longo de colheita; e permite o armazenamento por longos períodos (JONES, 1985). No ambiente agrônomo ou agrícola, produtividade é definida como a quantidade de produção por unidade de área, enquanto a produtividade por unidade de trabalho está associada à produtividade do trabalho, ou seja, a quantidade de produto que se obtém, utilizando uma unidade fator de trabalho.

É um produto proveniente da América Central, cultivado em grande parte do mundo e sua importância econômica é evidenciada pelas diversas formas de sua utilização, desde a alimentação animal até a indústria da alta tecnologia.

A idade estimada do milho é de 11 milhões de anos e o seu surgimento teria sido resultado de um evento de poliploidização que teria ocorrido após a divergência entre o sorgo e o milho sendo, portanto, considerado um poliploide antigo (GAUT et al., 2000).

A técnica de domesticação do milho iniciou-se na América Central e expandiu-se por povos pré-colombianos. Relíquias arqueológicas indicam que o milho já era conhecido na costa do Peru por volta de 900 a.C. e que, possivelmente, a cultura atingiu a costa do atlântico, atravessando a América do Sul de leste a oeste e transpondo a Cordilheira dos Andes (BRIEGER et al., 1958).

É, possivelmente, a espécie com maior variabilidade genética entre as plantas cultivadas no Brasil e no mundo. Essa cultura tem uma ampla adaptação ambiental, pois existem variedades de milho adaptadas a diversas condições climáticas, conforme a altitude e latitude local. Possui grande diversidade para caracteres quantitativos e qualitativos, incluindo a composição química dos grãos, a reação a doenças, a capacidade produtiva, a arquitetura de planta e o ciclo, entre outros (PATERNIANI et al., 2000).

O desenvolvimento de técnicas permitiu a recuperação de grãos de amido em artefatos arqueológicos e a estimativa da idade desses resíduos. Assim comenta-se que a origem do milho na América do Sul data cerca de 5.000 anos atrás e que, assim que domesticado, o milho se espalhou rapidamente do Oeste do México ao Noroeste da América do Sul (ZARILLO et al., 2008).

O cereal mais produzido no mundo é o milho. De acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos – USDA (2016), a produção mundial de milho em 2015/16 totalizou 1,007 bilhão de toneladas, contra 1,026 bilhão do ano anterior. A estimativa faz parte do relatório de junho do Sistema de Informação do Mercado Agrícola (AMIS), órgão do G-20 para divulgar dados de oferta e demanda das principais commodities globais.

As exportações foram elevadas de 124,335 milhões de toneladas para 125,335 milhões de toneladas. Os Estados Unidos colheram 343,678 milhões de toneladas de milho em 2015/16, uma revisão negativa de 0,73% em relação ao calculado no relatório passado (346,218 milhões de toneladas) e de 4,8% na comparação com 2014/2015 (361,091 milhões de toneladas). Já a produção brasileira em 2015/16 foi revisada para cima, de 75 milhões de toneladas para 77 milhões de toneladas. Comparando com as 82 milhões de toneladas de 2014/15, as exportações do país foram revistas para cima, de 24 milhões de toneladas para 26,5 milhões de toneladas, novo recorde. O aumento na produção foi determinado pela melhora no cenário de produção no Brasil, na China e na Ucrânia. O Departamento de Agricultura dos Estados Unidos publicou, no seu último relatório de oferta e demanda, as informações relacionadas à safra 2015/16, onde se projetou uma pequena redução na produção mundial do milho, bem como estoques finais, dado que o consumo se eleva, ficando próximo a produção mundial (USDA, 2016).

A Figura 2.1, mostra o comparativo da produção mundial de milho nas últimas cinco safras nos principais países produtores (em mil toneladas).

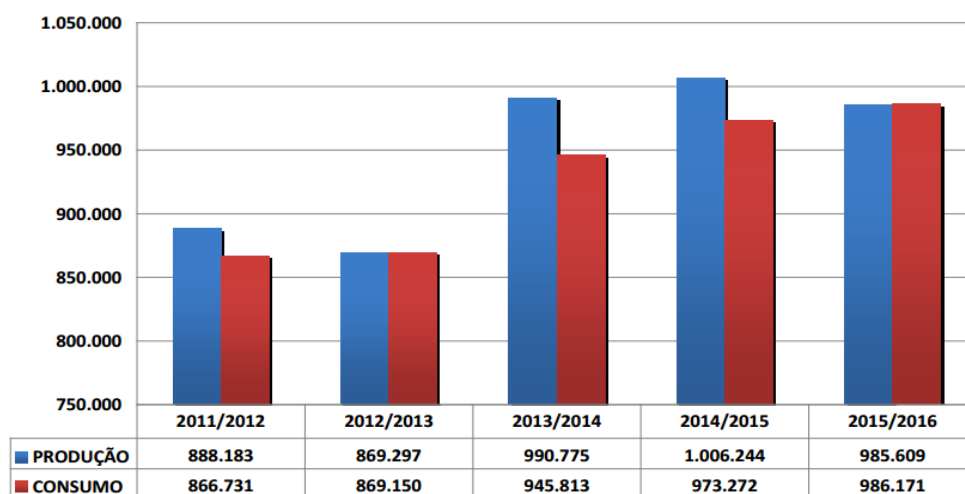


Figura 2.1 – Comparativo de produção e consumo mundial de milho.  
Fonte: USDA (2016).

O Brasil ocupa o terceiro lugar na produção mundial de milho, após os Estados Unidos e a China Continental, que são responsáveis por 70% da produção (ALVES et al., 2001).

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento, a produção total do cereal no Brasil na safra 2014/15 foi de 79,0 milhões de toneladas. Desse total, cerca de 48,0 milhões correspondem ao milho de segunda safra. Para 2024/25 a produção projetada é de 99,8 milhões de toneladas. Os estados do Mato Grosso e Paraná, são os maiores produtores de milho no Brasil, as áreas destinadas a plantação de soja são liberadas para o plantio do milho. No Mato Grosso geralmente planta-se a soja em meados de setembro e colhem em janeiro para em seguida iniciar o milho da segunda safra. O limite para esse plantio é fevereiro porque os riscos de perdas com a estação seca são grandes para essa região, caso seja ultrapassado esse período (CONAB, 2015).

Segundo pesquisas realizadas pela CONAB (2015), a área plantada de milho deve ter um acréscimo de 2,9% entre 2014/15 e 2024/25, passando de 15,2 milhões de hectares em 2014/15 para 15,6 milhões, podendo chegar a 21,4 milhões de hectares em 2024/25. Não haverá necessidade de novas áreas para expansão dessa atividade, pois as áreas de soja liberam a maior



parte das áreas requeridas pelo milho. O aumento de área projetado de 2,9% está bem abaixo do crescimento ocorrido nos últimos 10 anos, que foi de 17,3%. Mas o milho teve nos últimos anos elevados ganhos de produtividade, resultando em menor necessidade adicional de áreas. O consumo interno do milho que em 2014/15 representava 69,6% da produção deve reduzir-se nos próximos anos para 65,3% devido ao aumento das exportações. As exportações devem passar de 21,0 milhões de toneladas em 2015 para 31,7 milhões de toneladas em 2024/25. Para manter o consumo interno projetado de 65,2 milhões de toneladas e garantir um volume razoável de estoques finais e o nível de exportações projetado, a produção projetada deverá situar-se em torno de 99,8 milhões de toneladas em 2024/25. Segundo técnicos que trabalham com essa cultura a área deve aumentar mais do que está sendo projetado e talvez se aproximar mais do seu limite superior de crescimento que é de 21,4 milhões de hectares.

A Tabela 2.1, apresenta uma projeção da produção, do consumo e da exportação de milho em toneladas, entre 2014/15 e 2024/25. Como é usual nos trabalhos de projeções de longo prazo como OECD-FAO (2015), USDA (2016), os resultados são baseados em suposições que afetam a oferta, demanda, o comércio e os preços das commodities, como as políticas setoriais e políticas microeconômicas.

Tabela 2.1 – Projeção da produção, do consumo e da exportação de milho.

Ano	Produção		Consumo		Exportação	
	Projeção	Lsup.	Projeção	Lsup.	Projeção	Lsup.
2014/15	78.985	-	55.000	-	21.000	-
2015/16	81.062	95.045	56.071	57.787	22.327	30.467
2016/17	83.139	102.914	57.102	60.046	23.333	33.799
2017/18	85.216	109.435	58.120	62.131	24.403	37.052
2018/19	87.294	115.259	59.132	64.062	25.452	39.937
2019/20	89.371	120.637	60.142	65.879	26.504	42.636
2020/21	91.448	125.698	61.150	67.607	27.554	45.183
2021/22	93.525	130.520	62.157	69.267	28.603	47.614
2022/23	97.679	139.627	64.172	72.440	30.703	52.213
2024/25	99.756	143.974	65.179	73.970	31.752	54.409

Fonte: CONAB (2015).

A produção nacional de milho, em 2014/15, está distribuída nas regiões Centro-oeste, com 43,3%, Sul, 30,6% e Sudeste, 13,6%. Os principais estados produtores, Mato Grosso, Paraná, Mato Grosso do Sul, Goiás, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e São Paulo, respondem por 83,4% da produção nacional. No Centro-oeste, a liderança é de Mato Grosso, seguido por Mato Grosso do Sul, no Sul a liderança é do Paraná e no Sudeste por Minas Gerais. Estes são atualmente os principais produtores de milho do país (Figura 2.2).

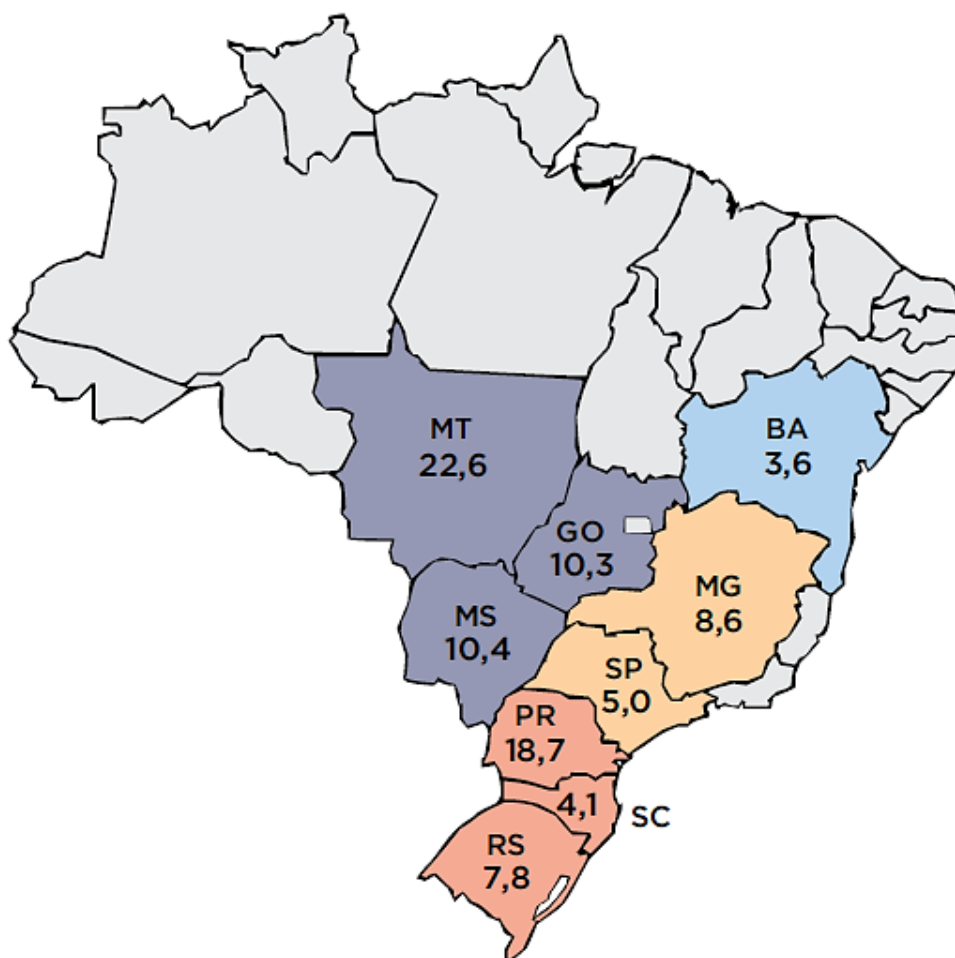


Figura 2.2 – Produção de milho – Brasil 2014/15.  
Fonte: (CONAB, 2015).

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), através do Centro de Milho e Sorgo, coordena uma das mais importantes pesquisas de seleção de novos genótipos de milho para as diversas regiões do Brasil, são os denominados Ensaios Nacionais e Regionais de Milho (EMBRAPA, 2011).

### 2.1.1 Uso do milho na alimentação

O milho é o cereal que possui o maior número de produtos industrializados. É utilizado, não somente na alimentação animal e humana, mas também nas indústrias farmacêutica, bélica e aérea. Tem sido consumido pelos povos americanos desde o ano 5 mil a.C., e foi a alimentação básica de várias civilizações importantes ao longo dos séculos. Os Maias, Astecas e Incas reverenciavam o cereal na arte e religião, sendo que grande parte de suas atividades diárias eram relacionadas ao seu cultivo. Com a descoberta da América e as grandes navegações do século XVI, a cultura do milho se expandiu para outras partes do mundo e, hoje, é consumido em todos os continentes (ABIMILHO, 2013; PINAZZA, 1993).

É o cereal mais consumido pela maioria das populações de vários países da América Latina, África e Ásia, constituindo-se a principal fonte energética e proteica desses povos (NATIONAL RESEARCH COUNCIL 1988).

O milho apresenta concentrações de cálcio e fósforo de cerca de 0,03 e 0,24% respectivamente, sendo que normalmente as rações, necessitam do acréscimo de fontes desses minerais. Quanto ao nível de proteína, Rostagno et al. (2005) apresenta o nível de 8,26%, sendo esse valor variável. O milho apresenta ainda quantidade satisfatória de metionina acrescido de cistina (0,36%) e nível muito baixo de lisina (0,24%). Quando misturado ao farelo de soja, haverá a complementação amino azídica, pois este alimento é rico em lisina, mas deficiente em metionina e cistina. Contudo, para que o milho esteja com boa qualidade nutricional, é necessário que estejam em bom estado de conservação.

Segundo pesquisas realizadas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, no Brasil, apenas cinco por cento do milho produzido se destinam ao consumo direto humano. É a matéria-prima principal de vários pratos da culinária típica brasileira, como canjica, cuscuz, polenta, angu, mingaus, pamonhas, cremes, bolos, pipoca ou, simplesmente, milho cozido. Na indústria, pode ser usado como componente para a fabricação de biscoitos, pães, chocolates, geleias, sorvetes e maionese (EMBRAPA, 2013).

De acordo com Lima et al. (1998), o emprego do milho na forma de silagem de grãos úmidos em rações para suínos tem sido uma alternativa para a armazenagem de grãos na propriedade, reduzindo os problemas e as perdas de valor nutricional verificadas na fase de pós-colheita, além de diminuir o período de ocupação da terra. Tem sido o cereal mais usado na

formulação de rações, no Brasil, por apresentar elevado nível energético, rico em amido (aproximadamente 72%), pobre em fibras e de alta palatabilidade. O milho combinado com o farelo de soja pode atender as exigências nutricionais nas rações de suínos, principalmente para os dois aminoácidos limitantes, a lisina e o triptofano (SEERLEY, 1991).

### 2.1.2 Composição química e estrutura anatômica do grão de milho

O milho é uma importante fonte energética para o homem. Ao contrário do trigo e o arroz, que são refinados durante seus processos de industrialização, o milho conserva sua casca, que é rica em fibras, fundamental para a eliminação das toxinas do organismo humano. Além das fibras, o grão de milho é constituído de carboidratos, proteínas e vitaminas do complexo B. Possui bom potencial, sendo composto de grandes quantidades de açúcares e gorduras, contém vários sais minerais como ferro, fósforo, potássio e zinco (Associação Brasileira das Indústrias do Milho – ABIMILHO, 2006).

Normalmente, os grãos do milho são amarelos ou brancos, podendo apresentar colorações variando desde o preto até o vermelho. O peso individual do grão varia, em média, de 250 a 300 mg e sua composição média em base seca é 72% de amido, 9,5% proteínas, 9% fibra e 4% de óleo. Denominado botanicamente como uma cariopse, o grão de milho é formado por quatro principais estruturas físicas: endosperma, gérmen, pericarpo (casca) e ponta (Figura 2.3), as quais diferem em composição química e também na organização dentro do grão.

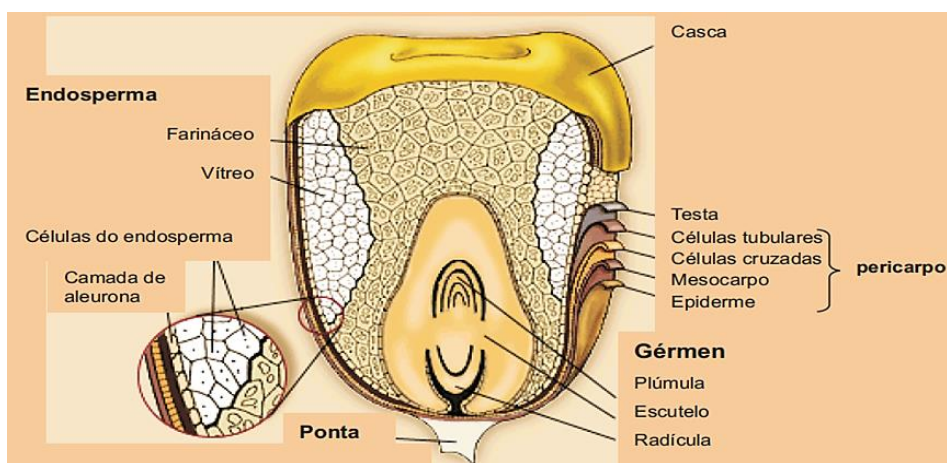


Figura 2.3 – Estrutura anatômica do grão de milho.

Fonte: adaptado de Britânica (2006).

O endosperma representa aproximadamente 83% do peso seco do grão, consistindo principalmente de amido (88%), organizado na forma de grânulos. No endosperma estão também presentes as proteínas de reserva (8%) do tipo prolaminas, chamadas zeínas.

Essas proteínas formam os corpos proteicos que compõem a matriz que envolve os grânulos de amido dentro das células no endosperma. Com base na distribuição dos grânulos de amido e da matriz de proteína, o endosperma é classificado em dois tipos: farináceo e vítreo.

No primeiro, os grânulos de amido são arredondados e estão dispersos, não havendo matriz proteica circundando essas estruturas, o que resulta em espaços vagos durante o processo de secagem do grão, a partir dos espaços onde antes era ocupado pela água, durante o desenvolvimento do grão. Por outro lado, no endosperma vítreo, a matriz proteica é densa, com corpos proteicos estruturados, que circundam os grânulos de amido de formato poligonal, não permitindo espaços entre estas estruturas.

A denominação vítreo/farináceo refere-se ao aspecto dos endospermas nos grãos quando sujeitos à luz. No endosperma farináceo, os espaços vagos permitem a passagem da luz, conferindo opacidade ao material. De forma oposta, a ausência de espaços entre os grânulos de amido e a matriz proteica promove a reflexão da luz, resultando em aspecto vítreo ao endosperma observado nessas condições. Essa propriedade tem sido aplicada para a identificação de materiais duros e farináceos, embora a vitreosidade e a dureza sejam distintas propriedades (SHOTWELL e LARKINS, 1989).

Tabela 2.2 – Percentual do constituinte total indicado nas estruturas físicas do milho.

Fração	% Grão	Amido	Lipídeos	Proteínas	Minerais	Açúcares	Fibras ou conteúdo celular
% da parte (base seca)							
Endosperma	82	98	15	73,5	17,8	28,3	27
Gérmen	11	1,3	83	23	78	70	12
Pericarpo	5	0,6	1,3	2,6	2,9	1,0	54
Ponta	2	0,1	0,7	0,9	1,3	0,7	7,0

Fonte: (ABIMILHO, 2006).

No endosperma, especificamente, na camada de aleurona e no endosperma vítreo, estão presentes os carotenoides, substâncias lipídicas que conferem a cor aos grãos de milho. Zeaxantina, luteína, betacriptoxantina, alfa e beta carotenos são os principais carotenoides nos grãos de milho. O gérmen representa 11% do grão de milho e concentra quase a totalidade dos lipídeos (óleo e vitamina E) (83%) e dos minerais (78%) do grão, além de conter quantidades importantes de proteínas (23%) e açúcares (70%), conforme pode ser observado na Tabela 2.2 (Associação Brasileira das Indústrias do Milho – ABIMILHO, 2006).

### 2.1.3 Classificação do milho quanto ao tipo de grão

Existem cinco classes ou tipos de milho: pipoca, duro, dentado, farináceo e doce. A maioria do milho comercial produzido nacionalmente é do tipo duro ou “flint”, enquanto, nos países de clima temperado, a predominância é do tipo dentado. A diferença entre os tipos de milho é a forma e o tamanho dos grãos, definidos pela estrutura do endosperma e o tamanho do gérmen (Figura 2.4). Milhos duros diferem dos milhos farináceos e dentados na relação de endosperma vítreo: endosperma farináceo.

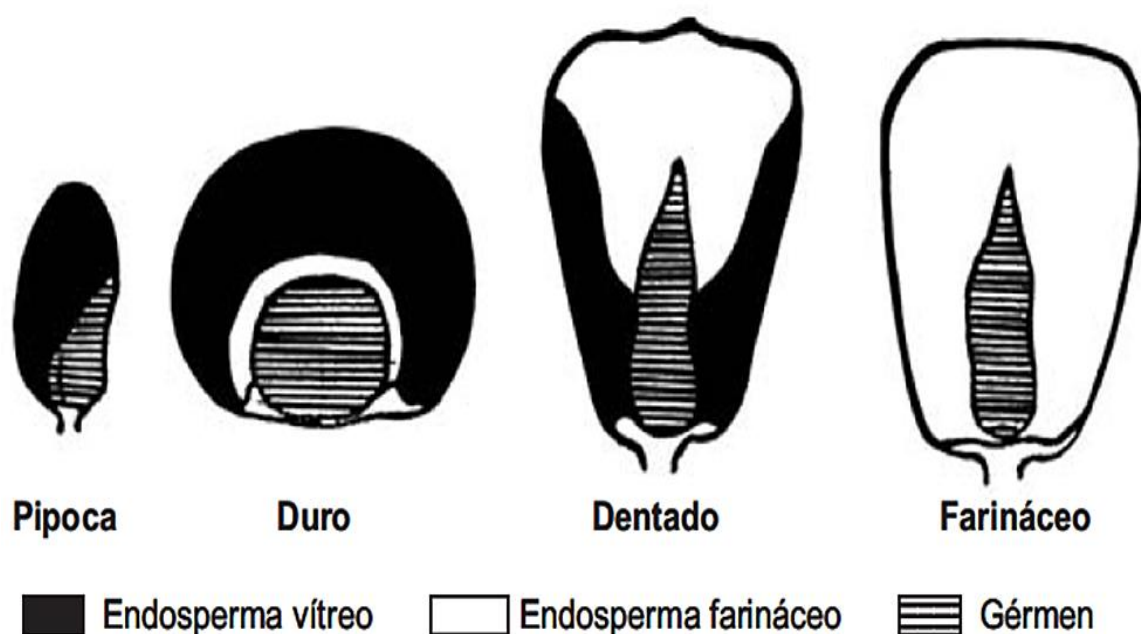


Figura 2.4 – Tipos de milho e as relativas proporções do endosperma farináceo e vítreo.  
Fonte: (ABIMILHO, 2006).

Nos milhos dentados, o endosperma farináceo concentra-se na região central do grão, entre a ponta e o extremo superior. Nas laterais dessa faixa e no verso do grão está localizado o endosperma vítreo. Durante a secagem do grão, o encolhimento do endosperma farináceo resulta na formação de uma endentação na parte superior do grão, caracterizando o milho como dentado. O milho duro possui um volume contínuo de endosperma vítreo, que resulta em grãos lisos e mais arredondados, com uma aparência dura e vítrea (HOSENEY 1994; JOHNSON 2000).

Nos grãos do tipo farináceo, existe a mesma endentação do milho dentado, porém o endosperma é completamente farináceo, resultando em uma aparência opaca. Os grãos de milho-pipoca possuem o pericarpo mais espesso, com o endosperma predominantemente vítreo, porém os grãos possuem menor tamanho e formato mais arredondado. Já os grãos de milho doce, quando secos, possuem aparência enrugada, isto porque os genes “sugary” ou “brittle” previnem a conversão dos açúcares em amido e o grão passa a acumular fito glicogênio, um polissacarídeo solúvel. (HOSENEY, 1994).

Normalmente, a classificação do milho quanto ao tipo dos grãos depende de quando os grãos já estejam secos e ainda aderidos ao sabugo, uma vez que, numa mesma espiga, pode haver grãos com aparência de dois tipos, devendo ser classificado com base na predominância.

#### **2.1.4 Qualidade do grão**

A qualidade dos grãos é analisada, utilizando diferentes técnicas de secagem. Raupp et al. (1999), durante estudos dos efeitos da secagem intermitente lenta de grãos de milho, verificou a qualidade fisiológica (através do teste de germinação e o vigor) e a química pela solubilidade proteica, concluindo que os experimentos realizados com temperaturas acima de 60°C apresentaram reduções significativas no vigor e na germinação das sementes e essas alterações foram atribuídas ao efeito térmico sobre a atividade das enzimas do metabolismo celular. A obtenção de grãos de alta qualidade depende de diversos fatores, como: características da espécie e da variedade, condições ambientais durante o seu desenvolvimento, época e procedimento de colheita, método de secagem e práticas de armazenagem. A temperatura, a umidade relativa, a velocidade do ar de secagem, a taxa de secagem do produto, o teor de umidade inicial e final do produto, o sistema de secagem empregado e o tempo de

residência do produto na câmara de secagem, são os principais parâmetros que podem estar associados à redução da qualidade dos grãos e sementes (BROOKER et al., 1992).

Segundo Melendez et al. (1992), as perdas na colheita dos grãos de milho aumentam à medida que o teor de umidade dos grãos diminui. Entretanto, outros autores, como Thompson e Foster (1963), Araújo (1995) e Silva, (1997) concluíram que o efeito dos danos mecânicos sobre a qualidade das sementes e dos grãos foi mais prejudicial quando foram colhidos com maior teor de umidade.

Os grãos e sementes podem ser duráveis, mas são também altamente perecíveis. Se forem colhidos em boas condições e subsequentemente mantidos com baixos teores de umidade e baixa temperatura, eles podem reter seu poder de germinação e outras qualidades por longos períodos (SILVA, 2003).

Dessa forma, pode-se verificar que a qualidade das sementes pode ser definida como um conjunto formado por todos os atributos genéticos, físicos, fisiológicos e sanitários que contribuem para a formação de plantas vigorosas, capazes não só de promover uma rápida emergência, mas também de garantir o seu estabelecimento, além de proporcionar crescimento e floração uniformes, garantindo, dessa forma, uma alta produtividade.

## **2.2 Secagem**

A secagem é uma das etapas mais importantes da fase de pós-colheita de grãos, pois, uma vez realizada adequadamente, o grão adquire condições necessárias para armazenamento e redução da umidade.

De acordo com Doretto et al. (2003), a conservação das propriedades dos grãos pode ser influenciada por alguns fatores, tais como: o meio ambiente, colheita precoce, ataques por agentes biológicos, contaminações e, principalmente, processos inadequados de secagem. Outros estudos como Puzzi (1986), Heuert (2004), Jayas e White (2003) e Silva, L. (2005) também apontam para tais questões.

Após sua colheita, o milho apresenta alto teor de umidade e, por isso, deve ser seco para que não fique susceptível a fermentação e/ou germinação, e possa ser transportado e armazenado por longos períodos.



Segundo Herter e Burris (1989a) e Chen e Burris (1990), o estágio de maturação das sementes e a temperatura de secagem são fatores importantes para que seja conseguida a secagem adequada. Com progressiva perda de água, as sementes tornam-se mais tolerantes à elevação de temperatura, ficando em torno de 40%, conforme Herter e Burris (1989b), o teor de água correspondente à transição de intolerância para tolerância a moderadas temperaturas.

A temperatura ótima para o processo de secagem deve ser vista com cautela, pois essa temperatura varia com o estágio de desenvolvimento da planta, por exemplo, a temperatura ótima para germinação não é a mesma para a floração ou frutificação, podendo ainda ser diferente da temperatura ótima para o desenvolvimento vegetativo (NUNES, 1993).

A influência da temperatura na produtividade de uma cultura de milho depende diretamente da relação intrínseca estabelecida entre a planta e o ambiente físico em que se encontra com ênfase para a temperatura, luz, ventos e disponibilidade hídrica, o que determina a adaptação de diferentes genótipos, para diferentes ambientes, em função do manejo adotado (PALHARES, 2003).

A temperatura do ar de secagem é fundamental no processo de secagem, pois, juntamente com o fluxo de ar, é o principal fator determinante da velocidade de secagem (SILVA, J. 2000). O que limita o uso de temperatura elevada são as consequências sobre a qualidade dos grãos. Temperatura muito alta conduz a alta taxa de evaporação de água na superfície. Se a taxa de transporte de água do interior para a superfície torna-se inferior à taxa de evaporação da água na superfície, aumenta o gradiente de umidade entre o interior e a superfície dos grãos, gerando tensões internas que provocam danos mecânicos por trincamento (LASSERAN, 1978; VILLELA, 1991), aumenta a suscetibilidade à quebra dos grãos (BAKKER-ARKEMA, 1994) e pode constituir-se em porta de entrada para micro-organismos como fungos.

A secagem destaca-se por sua grande importância dentro do sistema de produção agrícola, ressaltando-se que, por meio dela, pode-se antecipar a colheita, armazenar o produto por longo tempo sem que haja deterioração do mesmo, manter a viabilidade de sementes e, também, permitir ao produtor comercializar um produto de melhor qualidade (HENDERSON et al., 1997).

Segundo Baudet et al. (1999), a secagem é um processo fundamental da tecnologia para a produção de sementes de alta qualidade, pois permite a redução do teor de água em níveis

adequados para o armazenamento, preserva as sementes de alterações físicas e químicas, induzidas pelo excesso de umidade, e torna possível a manutenção da qualidade inicial durante o armazenamento, possibilitando colheitas próximas da maturidade fisiológica.

A retirada da água dos grãos envolve duas fases, que ocorrem simultaneamente: o transporte do vapor de água da superfície do grão para o ar Inter granular, devido ao gradiente de pressão parcial de vapor de água e o movimento de água do interior para a superfície do grão (HALL, 1980).

É um processo complexo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar, ocorrendo remoção de umidade do meio poroso, pela difusão desta e evaporação, normalmente causada por convecção forçada de ar aquecido, de modo a garantir a manutenção de sua qualidade durante o período de armazenagem. A retirada da umidade deve ser feita em nível tal que o produto fique em equilíbrio com o ar do ambiente onde será armazenado e deve ser feita de modo a preservar a aparência e a qualidade nutritiva.

A remoção da umidade é obtida a partir da movimentação da água, decorrente de uma diferença de pressão de vapor d'água entre a superfície do produto a ser secado e o ar que o envolve. Para que um produto seja submetido ao processo de secagem, é necessário que a pressão de vapor sobre a superfície do produto, seja maior do que a pressão de vapor d'água no ar de secagem, o processo ocorre com a transferência de calor do produto por convecção, através do ar, ou por condução, a partir do contato com uma superfície quente. Esse calor é utilizado para vaporizar o líquido na superfície do sólido ou próximo da superfície se a mudança de estado ocorrer no interior do corpo (BROOKER et al., 1992).

O processo de secagem de grãos e sementes pode ser dividido em um período de taxa constante e outro de taxa decrescente, sob condições constantes de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar.

Quando a taxa é constante, a temperatura do produto se mantém igual à do ar de secagem saturado e as transferências de calor e massa se compensam. O mecanismo interno de fluxo de água não afeta a taxa de secagem porque a taxa de deslocamento interna da água para a superfície do produto é igual ou maior do que a máxima taxa de remoção de vapor d'água pelo ar, sendo evaporada apenas a água livre (FOUST et al., 1982; SODHA et al., 1987).

Os grãos e sementes apresentam, em geral, um período de secagem à taxa constante muito curto, ou inexistente, porque, nas condições operacionais de secagem, as resistências às transferências de água encontram-se essencialmente no seu interior, tornando a taxa de evaporação superficial acentuadamente superior à taxa de reposição de água do interior para a superfície (KREYGER, 1973).

No período de taxa decrescente de secagem, a taxa de transporte interno de água é menor do que a taxa de evaporação; sendo assim, a transferência de calor do ar para as sementes não é compensada pela transferência do vapor de água e, em consequência, a temperatura da semente aumenta, tendendo à temperatura do ar de secagem (HALL, 1980; FOUST et al., 1982).

Vários autores têm proposto que o principal mecanismo de transporte de água seja a difusão líquida (FORTES e OKOS, 1980; GEANKOPLIS, 1983). A difusão líquida é um mecanismo muito complexo, em virtude da diversidade da composição química e a estrutura física dos produtos, ocorre nos sólidos de estrutura fina e nos capilares, poros e nos pequenos orifícios cheios de vapor, devido aos gradientes de temperatura (difusão de calor) e de concentração da umidade (difusão de massa). O meio não se movimenta enquanto que massa e energia são transferidas de molécula a molécula (MOHSENIN, 1986). De acordo com Brooker et al. (1992), na teoria da difusão líquida, a segunda lei de Fick tem sido utilizada para estabelecer a difusão da água em função do gradiente de concentração.

A secagem é um processo que deve ser previsto, dimensionado e planejado, sendo útil para qualquer projetista ou pesquisador a utilização de um programa que permita a simulação desse processo de forma a predizer, de acordo com as condições de uma região, o melhor tipo de secador a ser usado e as condições de secagem, bem como o tempo necessário para realizá-la (CAVALCANTI MATA et al., 1999).

Lima (1999), Nascimento (2002) e Carmo (2004) observaram que, em geral, no decorrer da secagem de sólidos constituídos de material poroso, ocorre uma retração, ou seja, um encolhimento dos produtos em decorrência da difusão de água, bem como uma variação nas propriedades termofísicas do material, que podem depender da temperatura, do teor de umidade e da própria estrutura física do corpo.

O efeito de encolhimento nos modelos de secagem depende do conhecimento das propriedades relativas ao fenômeno. Há falta de informações na literatura sobre os coeficientes de encolhimento, assim como de relações matemáticas entre a difusividade de massa,

encolhimento e densidade. Embora vários trabalhos incluam o efeito de encolhimento volumétrico no estudo do processo de secagem, fornecendo interpretações teóricas sobre o mesmo, relativamente poucas pesquisas têm sido reportadas na literatura sobre estudos do fenômeno de encolhimento em problemas bidimensionais e tridimensionais (LIMA, 1999; LIMA et al., 2002; LIMA e NEBRA, 2000b; CARMO, 2004; CARMO e LIMA, 2005; OLIVEIRA, 2006).

Em produtos capilares porosos, como a maioria dos produtos agrícolas, os possíveis mecanismos de transporte de água são: difusão líquida; difusão capilar; difusão na superfície; fluxo hidrodinâmico; difusão de vapor; e difusão térmica (MARTINAZZO et al., 2007).

Diversos autores afirmaram que a água em meios capilares porosos pode até mover-se em sentido contrário ao gradiente do teor de umidade, mas sempre na direção do gradiente do teor de umidade de equilíbrio. A teoria proposta foi usada em vários trabalhos de pesquisa como, por exemplo, na secagem de grãos de trigo. Cada grão de trigo foi considerado como uma esfera (FORTES e OKOS, 1980).

De acordo com Silva, C. (2012), no modelo difusivo, a movimentação de água dentro do produto é explicada principalmente pela diferença de concentração de umidade e matematicamente é representada pela equação de difusão.

Considera-se que a resistência interna e externa aos fluxos de massa é capaz de prever a distribuição de umidade no interior de um sólido, em um dado instante de tempo. Normalmente, é usada para descrever o transporte de água em meios porosos.

A teoria da difusão líquida assume que não há influência da capilaridade, despreza os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro e também considera que os corpos entram em equilíbrio térmico com o ar instantaneamente, o que pode induzir a discrepâncias entre os resultados encontrados (GONELI et al., 2007).

A difusividade é a facilidade com que a água é removida do material. Como varia conforme mudam as condições de secagem, e por isso não é intrínseca ao material, convencionou-se chamá-la, então, de difusividade efetiva (OLIVEIRA et al., 2012). O coeficiente de difusão efetivo pode ser usado quando os grãos são considerados materiais homogêneos.

### 2.3 Modalidades de secagem

Modernas técnicas de secagem vêm sendo desenvolvidas para atender às crescentes necessidades dos produtores, com o objetivo de simplificar e reduzir os custos. Essencialmente, podem ser consideradas duas modalidades de secagem: natural e artificial (LASSERAN, 1978; HALL, 1980).

A classificação das modalidades de secagem serão descritas como mostra na Figura 2.5.

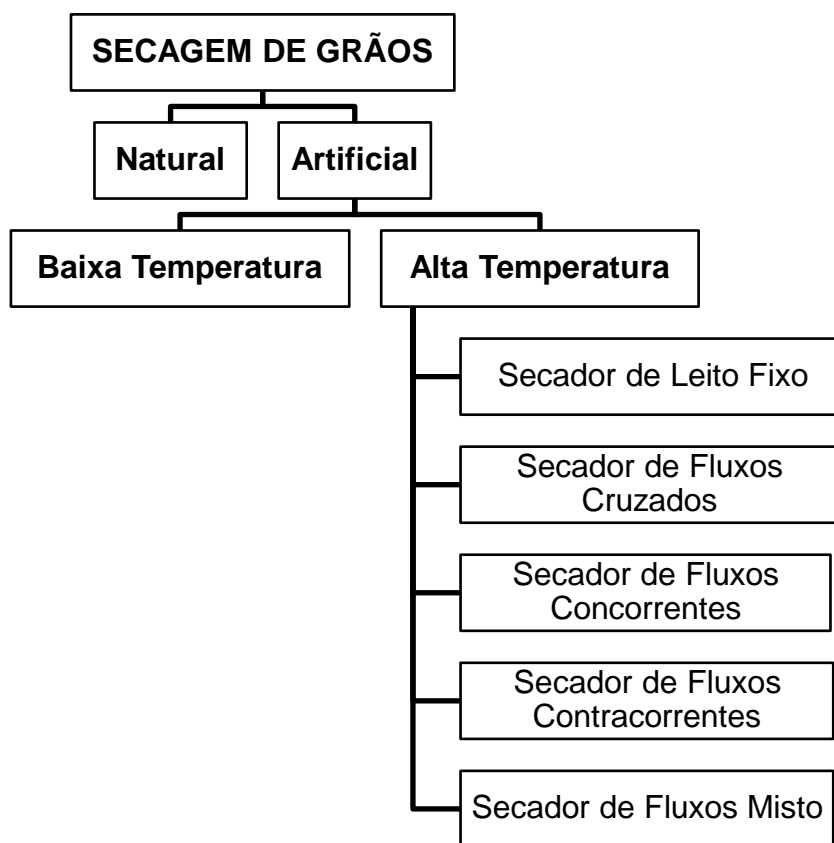


Figura 2.5 – Classificação das modalidades de secagem de grãos.

De acordo com Garcia et al. (2004) os métodos de secagem são classificados quanto ao uso de equipamentos: natural ou artificial. No método artificial se classifica também quanto à periodicidade no fornecimento de calor (contínuo ou intermitente).

A secagem artificial vem sendo utilizada como uma operação de rotina nas empresas de sementes, principalmente, nos estados da região Sul do Brasil e, não obstante as vantagens que apresenta, é uma operação de risco, podendo proporcionar danos irreversíveis se realizada sem

os conhecimentos e cuidados necessários à preservação da qualidade inicial das sementes (MIRANDA et al. 1999). A secagem de grãos e sementes é fundamental para o sistema de produção, pois, além de reduzir o teor de água, permite a preservação de sua qualidade fisiológica durante o armazenamento, possibilita a antecipação da colheita evitando perdas de natureza diversa. Na escolha do método de secagem, o fator quantidade de grãos e sementes é limitante e, quando necessitamos secar grandes quantidades, é imprescindível a utilização da secagem artificial, cujos custos de operação estão relacionados, principalmente, com volume, velocidade de secagem e temperatura do ar.

Segundo Belessiotis e Delyannis (2011) a secagem por exposição ao sol é um dos métodos mais antigos de uso de energia solar para a conservação de alimentos como grãos, frutas, vegetais, entre outros. Este método de secagem tem baixo custo na sua utilização e não necessita de mão de obra especializada.

### **2.3.1 Secagem natural**

A secagem natural utiliza energia solar e eólica para remover a umidade dos grãos, utilizando materiais como: lonas, terreiros de terra batida, cimentados e lajedos. Entretanto cuidados especiais devem ser tomados para que as sementes não sofram aquecimento excessivo e que a secagem ocorra do modo mais uniforme possível. Desse modo, a secagem natural, em geral, torna-se um pouco suscetível a riscos de danificação mecânica e térmica sendo, no entanto, dependente das condições do ar ambiente, que, muitas vezes, não são adequadas para a secagem das sementes (CARVALHO e NAKAGAWA, 2000).

Esse tipo de secagem, muitas vezes é realizada na própria planta, pela ação do ar e do sol, sendo dependente das condições atmosféricas. A desvantagem dessa modalidade é a dependência das condições climáticas e a vantagem é o fato de propiciar menor ocorrência de grãos trincados e/ou quebrados.

A secagem natural tem sido empregada no Brasil, para produtos como: café e cacau em barcas, como também por pequenos agricultores na secagem de milho, arroz e feijão.

Em virtude das limitações do método natural, que necessita da ocorrência de combinações favoráveis de fatores sob os quais não se tem controle, surgiram os métodos

artificiais que, na atualidade, são mais empregados, entretanto existem vários métodos de secagem artificial, sendo os principais: ar forçado com ou sem aquecimento, circuito fechado com dissecador, secador infravermelho entre outros.

### 2.3.2 Secagem artificial

A secagem artificial permite a rápida redução da umidade das sementes, evitando alterações fisiológicas, como: oxidação dos glucídios, fermentações intracelulares e desenvolvimento de bactérias e fungos, geralmente acompanhados pelo aquecimento das sementes. A secagem artificial baseia-se, principalmente, na passagem forçada de ar através do produto, a temperatura ambiente ou aquecido (HALL, 1980).

A secagem artificial pode ser feita com o uso de um fluxo de ar sobre o produto, e ainda a vácuo, a frio, por micro-ondas, dentre outras possibilidades. Detalhes sobre estes tipos de secagem podem ser encontrados, por exemplo, em Silva, C. (2010).

De um modo geral, os métodos de secagem artificiais empregam diversas condições de temperatura e fluxo de ar, tempo e formas de movimentação das sementes ou dos grãos e de contato entre ar e grãos, havendo diferentes secadores comerciais de acordo com o princípio de operação (VILLELA e SILVA, 1992; ELIAS, 2000).

Em função da temperatura do ar de secagem, a secagem artificial é subdividida em: (a) secagem a baixa temperatura, e (b) secagem a alta temperatura.

- (a) **Secagem a baixa temperatura:** é uma modalidade na qual o ar de secagem é aquecido em no máximo 10°C acima da temperatura ambiente. Este tipo de secagem pode durar de 15 a 30 dias e depende da temperatura, umidade relativa e vazão do ar de secagem. É necessário que esses três parâmetros sejam definidos corretamente para que a secagem seja completada sem a ocorrência de degradação do produto.
- (b) **Secagem a alta temperatura:** Esta modalidade opera com temperaturas do ar superiores a 10°C da temperatura ambiente.

Essa última ainda pode ser classificada em relação aos sentidos dos fluxos do ar de secagem e da massa de grãos, e quanto à forma e à técnica de funcionamento dos secadores.

Dentre as diversas técnicas de secagem, podemos destacar a secagem em camada fina que é utilizada, por exemplo, para simulações, tendo em vista o desenvolvimento de secadores. A camada fina, segundo Jayas et al. (1991) “é uma espessura que satisfaz a exigência da temperatura e umidade relativa do ar de secagem não se alterarem ao passar através da camada de grãos no processo de secagem”. No entanto, como observado por Khatchatourian et al. (2009), na realidade, valores locais desses parâmetros variam como resultado da transferência de calor e massa entre o grão e o ar.

O desenvolvimento e otimização de secadores e de sistemas de secagem requerem o estudo das propriedades físicas de cada produto, incluindo as curvas de secagem em camada fina. A secagem em camada fina é definida como aquela com a espessura de apenas um grão.

A equação para essa cinética de secagem somada a equações representativas de outras propriedades físicas específicas do produto em estudo formam um conjunto de relações matemáticas que auxiliam nos cálculos e no entendimento dos processos de secagem.

### **2.3.2.1 Secagem contínua**

A secagem contínua é um método artificial que consiste na ação contínua do ar aquecido sobre um produto úmido. Esta ação ocorre até que o teor de umidade do produto atinja o valor desejado (MILMAN, 2002).

Na secagem contínua, a fonte de calor pode ser variável. O que caracteriza um método como artificial é o fato de que o processo é executado com o auxílio de alternativas mecânicas, elétricas ou eletrônicas e o ar, que atravessa a massa de sementes, é forçado (CAVARIANI, 1996).

Diversos pesquisadores têm utilizado a secagem contínua para descrever a cinética de secagem dos mais variados produtos. Dentre os quais Silva, (2013) observou, trabalhando com temperatura de 40, 50, 60 e 70°C, que quanto maior a temperatura do ar de secagem menor o tempo relativo ao processo de secagem.



### 2.3.2.2 Secagem intermitente

A secagem intermitente é caracterizada pela permanência das sementes em contato com o ar aquecido por períodos curtos, intercalados com períodos sem exposição ao fluxo de ar aquecido na câmara de equalização. O período de equalização possibilita a redistribuição da umidade no interior das sementes, reduzindo os gradientes hídrico e térmico (VILLELA e PESKE, 1997). Na secagem intermitente, o período de equalização permite aumentar a quantidade de água removida por unidade de tempo em relação à secagem contínua.

### 2.3.2.3 Via radiação eletromagnética

A secagem artificial via radiação eletromagnética é um processo de aquecimento que envolve a aplicação de radiação dentro do intervalo de comprimento de onda correspondente a 0,75 até 100  $\mu\text{m}$ . Esse método de aquecimento está se tornando uma fonte importante de tratamento de calor na indústria, isso por causa das diversas vantagens existentes: equipamentos simples e de fácil manipulação, rápida resposta transiente e economias significativas de energia.

Muitos dos tratamentos térmicos são realizados com aquecimento infravermelho, dentre eles a inativação de substâncias tóxicas e antimicrobianas com a degradação das enzimas, redução da contagem microbiana e valorização dos grãos, em geral, dos grãos de cereais, leguminosas e oleaginosas (VILLELA e SILVA, 1992; MIRANDA et al., 1999).

Vários estudos mostraram que a transferência de massa em colheitas agrícolas é principalmente um processo de difusão (FORTES e OKOS, 1980). Nesses processos, a transferência de massa no material leva em consideração as resistências internas e externas de uma única partícula de grão para movimento da umidade.

## 2.4 Teorias de secagem

Várias teorias são utilizadas para descrever o processo secagem. Entre os diversos estudos realizados pela comunidade científica, podem-se destacar as teorias de transferência de calor e massa em corpos porosos, tais como:

### 2.4.1 Teoria da capilaridade

A teoria da capilaridade faz referência ao fluxo de um líquido através dos interstícios e sobre a superfície de um sólido, como sendo devido a atrações moleculares entre o líquido e o sólido (HOUGEN, 1940). É fundamentada no conceito do potencial capilar, que pode ser entendido como a diferença de pressão entre a água e o ar, na interface água-ar, presente em um capilar.

Nas hipóteses em que as condições sejam isotérmicas, o potencial capilar é assumido de forma proporcional ao gradiente de concentração da umidade. Segundo Hougen (1940), na secagem de sólidos granulares, o fluxo de água é completamente determinado por forças capilares, sendo independente da concentração de água.

Na secagem de alimentos, a teoria do fluxo capilar tem sido aceita principalmente para os estágios da secagem de materiais com alto teor de umidade.

### 2.4.2 Teoria da difusão líquida

Na teoria da difusão líquida, uma parte do calor aquece o corpo e a outra parte vaporiza a água líquida que é transferida para a sua superfície, sendo que o vapor produzido é retirado das vizinhanças pelo fluxo de ar. A difusão líquida tem como modelo matemático a equação de Fick, considerando que o fluxo de umidade no interior do sólido é gerado por um gradiente de concentração. Essa teoria é frequentemente usada para descrever o transporte de água em meios porosos em geral, e em particular na descrição da secagem de corpos úmidos (SILVA et al., 2010).

Geralmente os modelos difusivos baseiam-se na difusão de líquido ou de vapor ou de ambos, dentro do produto. Esses modelos descrevem as taxas de transferência de calor e massa como função da posição dentro do sólido e do tempo de secagem e consideram as resistências aos fluxos de calor e massa externa e interna. Normalmente ocorre devido aos gradientes de temperatura (difusão de calor) e de concentração da umidade (difusão de massa). O meio não se movimenta enquanto que a massa e energia são transferidas de molécula a molécula (MOHSENIN, 1980).

Para solucionar a equação da difusão escrita em coordenadas cartesianas para geometrias tridimensionais e válidas apenas para parede infinita, placas retangulares ou paralelepípedos, alguns trabalhos podem ser encontrados na literatura (OHARA et al., 2004; SILVA, L. 2005; CADÉ et al., 2005; NASCIMENTO et al., 2005; NASCIMENTO et al., 2006; BATISTA et al., 2008; RAFIEE et al., 2008; ALMEIDA, 2009; FARIAS et al., 2009a; FARIAS et al., 2009b).

### **2.4.3 Teoria da condensação – evaporação**

Na teoria da condensação-evaporação, o vapor de água do interior do produto é condensado perto da superfície; assumindo a taxa de condensação igual à taxa de evaporação, não havendo acúmulo de água nos poros próximos à superfície.

De acordo com Fortes e Okos (1980), o modelo teórico da condensação-evaporação foi originado pelos trabalhos de Henry (1939), quando da tentativa de compreensão da umidade existente em fardos de algodão. Esse modelo considera que o sólido é constituído por redes contínuas de poros e as equações que governam o fluxo de umidade no material são obtidas através de um balanço apropriado de calor e massa. O balanço de massa considera o movimento de vapor através do sólido, e o balanço de energia é feito considerando o fluxo de calor por condução, adicionando o calor envolvido na adsorção e/ou absorção de umidade pelo sólido.

### **2.4.4 Teoria de Krischer**

Segundo Fortes e Okos (1980), Krischer assumiu que, durante a secagem, o fluxo de umidade pode-se dar no estado líquido, por capilaridade, ou no estado de vapor devido a um gradiente de concentração de vapor. Estudos apontam que essa teoria leva em conta a transferência de calor e massa simultaneamente e pode ser aplicada a uma variedade de meios porosos. A teoria de Krischer serve de suporte para estudos complexos como o de Berger e Pei (1973) e tem sido aplicada para análises em variados tipos de alimentos (FORTES e OKOS, 1980).

De uma forma geral, os modelos que consideram as transferências simultâneas de calor e massa, são complexos, sobretudo quando se considera a variação dos coeficientes de difusão de massa com a temperatura e o teor de água; além disso, leva-se em conta a deformação do produto e sua heterogeneidade o que aumentaria ainda mais a dificuldade (BROD, 2003).

#### **2.4.5 Teoria de Luikov**

Essa teoria baseia-se nos princípios da termodinâmica de processos irreversíveis e assume que os fluxos de umidade devido à difusão de vapor e líquido são devidos respectivamente a um gradiente de temperatura e de concentração total de umidade no interior do sólido.

As equações que descrevem o modelo sugerem que o transporte molecular de vapor d'água, ar e líquido acontecem simultaneamente. Quando mais de uma força propulsora ocorre no sistema, efeitos simultâneos podem aparecer. Utilizando os princípios da termodinâmica para descrever o processo, a combinação desses efeitos aparece nas equações como termos cruzados em relação aos fluxos de calor e massa.

O modelo matemático da teoria de Luikov é amplamente discutido na literatura, o destaque feito neste texto é que a teoria agrega simultaneamente os fluxos de umidade na forma de vapor e líquido (CARMO, 2004). As equações que define o modelo de Luikov levam em consideração que o transporte molecular de vapor d'água, ar e líquido acontece ao mesmo tempo (LUIKOV, 1975).

#### **2.4.6 Teoria de Phillip – De Vries**

Philip e De Vries consideram que, em materiais porosos, a água se move através da difusão de vapor e por capilaridade, citados por Fortes e Okos, 1980. Avalia-se que fluxo de vapor é dependente da concentração e dos gradientes de temperaturas no sólido, e o fluxo de umidade na fase líquida é devido a efeitos de capilaridade e pode-se dar em condições isotérmicas ou não.

De acordo com Philip e De Vries, o fluxo de umidade é verificado devido a potenciais gravitacionais. Em geral, pode-se dizer que a difusividade líquida é um fator importante para condições em que estão presentes altos teores de umidade, enquanto que a difusividade de vapor é importante para condições de baixo valor do teor de umidade.

## 2.5 Secadores

De acordo com Silva, M. (2005), a classificação dos secadores quanto aos fluxos de ar de secagem e massa de grãos é estudada há muitos anos e, periodicamente, sofre atualizações. Os secadores são classificados em:

- i) **Secadores de leito fixo:** a camada de grãos permanece estática durante a secagem e, por isso, faz-se necessário o revolvimento a cada 3 horas. Assim, a secagem do produto acontece uniformemente. Alguns fabricantes comercializam esses secadores com revolvimento mecânico, deixando o processo ininterrupto. É mais empregado para milho em espigas, feijão em ramas, café e arroz. Segundo Srivastava e John (2002), as simulações do processo de secagem de grãos, variando a altura de um leito fixo, são mais eficientes quanto maior a altura do leito.
- ii) **Secadores de fluxos cruzados:** os fluxos de grãos e ar de secagem cruzam sob um ângulo de 90° na câmara de secagem. São secadores com duas câmaras de secagem. Na primeira, a superior, há um ventilador axial e, na segunda, dois. Junto aos ventiladores, existem os geradores de calor.
- iii) **Secador de fluxos contracorrentes:** os fluxos de grãos e ar de secagem ocorrem em sentidos contrários, sendo que o fluxo de grãos ocorre no sentido da gravidade e o fluxo de ar em sentido ascendente. À medida que ocorre a secagem, a camada de grãos seca é transportada para silos armazenadores ou é depositada na parte superior da massa de grãos. Para tanto, o sistema de movimentação de grãos é acionado por um termostato que monitora o avanço da frente de secagem.

- iv) Secador de fluxos concorrentes:** os fluxos de ar de secagem e grãos têm o mesmo sentido de deslocamento. As configurações comerciais possuem grandes alturas, vários estágios de secagem e descanso, e circuitos de reaproveitamento do ar de secagem.
- v) Secador de fluxos mistos ou secador tipo cascata:** é o modelo de secador mais utilizado pelas unidades armazenadoras brasileiras, disponibilizado com capacidades de secagem de 10 a 300 ton/h. possui uma torre central montada pela superposição vertical de caixa de dutos. Uma caixa duto é formada por dutos em uma fileira horizontal. O nome cascata é definido devido à característica do movimento da massa de grãos por entre os dutos. Cerca de 1/3 da altura da torre é destinado à câmara de resfriamento, cujo objetivo é retirar calor da massa de grãos, deixando-a com temperatura adequada para armazenagem. Muitos secadores aproveitam o ar que sai da seção de resfriamento, misturando-o ao ar de secagem.

Quanto à forma de funcionamento, Puzzi (1986), entre outros, classificou os secadores em: contínuos ou de carga.

- i) Secador de Fluxo Contínuo:** o grão entra úmido na parte superior e é descarregado seco e frio na parte inferior. A massa de grãos flui continuamente através do secador e um dispositivo regula o fluxo de grãos de acordo com a quantidade de carga a ser retirada. A faixa de umidade retirada em cada passagem é da ordem de 5%, e a capacidade dele varia de 10 a 300 toneladas/hora.
- ii) Secador de carga:** secam uma determinada quantidade de grãos depositados em uma câmara, onde o ar é forçado por meio de um ventilador motorizado. Quando a secagem de um lote ou carga estiver concluída, a massa de grãos é resfriada e o secador é reabastecido com grãos úmidos.

## 2.6 Efeito do encolhimento na secagem

Durante o processo de secagem, especialmente de produtos com alto teor de umidade inicial, como é o caso de frutas, vegetais, grãos e sementes, o encolhimento é um fenômeno físico bastante significativo. Em virtude desse fenômeno, o produto sofre alterações em sua forma e dimensões originais.

Diversos autores têm incluído o fenômeno do encolhimento em seus modelos, porém, com diversas formas de tratamento. Para alguns autores, o encolhimento dos materiais submetidos à secagem pode ser considerado proporcional ao volume de água removida durante o processo (BALABAN, 1989; QUEIROZ, 1994; LANG et al., 1994; LIMA, 1999; GOUVEIA et al., 1999; AFONSO JÚNIOR et al., 2000; CARMO, 2004; SILVA, 2007).

O desprezo do efeito do encolhimento durante o processo de secagem constitui uma hipótese questionável, sobretudo quando se refere a produtos que sofrem grandes alterações em suas dimensões e forma original, quando submetidos a um processo de secagem.

O fenômeno de encolhimento deve ser incluído na modelagem matemática com o objetivo de obter-se uma representação mais realística do processo e, garantir maior confiabilidade nos valores dos parâmetros físicos determinados com a utilização do referido modelo (CARMO, 2004).

Lang et al. (1994) introduziram a propriedade de encolhimento no modelo de Bakker-Arkema para a secagem de grãos (em camada espessa) e uma melhor precisão na predição da cinética de secagem do trigo foi obtida. O encolhimento do produto foi introduzido nesse modelo considerando que o número de camadas do grão permanece o mesmo, no entanto cada uma das camadas do grão cujo comprimento inicial é  $\Delta x$  sofre um encolhimento que varia linearmente com o teor de umidade.

Afonso Júnior et al. (2000) estudaram o efeito da variação do teor de umidade na porosidade, massa específica e contração volumétrica de grãos de milho (*Pennisetum glaucum*). A redução do teor de umidade provocou no milho, redução da porosidade e aumento da massa específica. O volume dos grãos diminuiu com a perda de água e a contração volumétrica apresentou-se como função linear do teor de umidade do grão.

## 2.7 Cinética de secagem

A obtenção da cinética de secagem é de fundamental importância para a modelagem matemática da operação e projeto de secadores (GOUVEIA et al., 2011). Possibilita a determinação do mecanismo predominante na transferência de massa do material para o fluido e as respectivas equações matemáticas correspondentes (FERREIRA, 2004).

O entendimento do sistema de secagem, seu dimensionamento, otimização e a determinação da viabilidade de sua aplicação comercial podem ser realizados a partir da simulação matemática.

De acordo com Villar (1999), as curvas de secagem à taxa decrescente podem ser côncavas, convexas ou se aproximarem de uma linha reta; podem apresentar um ponto de inflexão quando ocorre uma mudança na forma física do material, como por exemplo, quando se produz contração e ruptura, e quando se forma uma película na superfície do material parcialmente seco.

Segundo Cano-Chuca et al. (2004), as curvas de secagem permitem prever o momento do processo em que se atinge o teor de umidade desejado e, dessa forma, obtém-se um produto de boa qualidade. Vilela e Artur (2008), relatam que as informações contidas nas curvas de secagem são de fundamental importância para o desenvolvimento de processos e para o dimensionamento de equipamentos; com elas, pode-se estimar o tempo de secagem de certa quantidade de produtos e, com o tempo necessário para a produção, estima-se o gasto energético que refletirá no custo de processamento e, por sua vez, influenciará no preço final do produto. No dimensionamento de equipamento, podem-se determinar as condições de operação para a secagem e, com isso, a seleção de trocadores de calor, ventiladores e outros.

O princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas do produto, utiliza-se um modelo matemático que representa satisfatoriamente a perda de umidade do produto durante o período de secagem. Segundo Silva, C. (2012), a secagem de grãos é feita em camada espessa, entretanto experimentos sobre a secagem de tais produtos em camada fina possibilitam obter informações que correlacionam as variáveis de interesse, tais como temperatura, velocidade do ar de secagem, duração do processo, energia consumida, teores de umidade inicial e final, dentre outras.



Existe uma grande variedade de modelos disponíveis na literatura, dentre eles podemos citar: modelos empíricos (DINCER, 1998; JIAN-FENG et al., 2007); modelos baseados na lei de Darcy (PINHEIRO et al., 1998) e modelos de difusão. O modelo de difusão é muito usado para descrever a cinética de secagem de madeira (LIU e SIMPSON, 1996; DINCER, 1998; LIU e SIMPSON, 1999; BARONAS et al., 1999; BARONAS et al., 2001; LIU et al., 2001; KULASIRI e WOODHEAD, 2005; RICARDEZ et al., 2005).

Para cada pesquisa na qual a secagem é descrita através do modelo difusivo, necessariamente a equação de difusão deve ser resolvida, pois cada pesquisador obtém diferentes soluções para as condições específicas de cada processo de secagem.

### **2.7.1 Modelagem matemática de secagem**

Os modelos matemáticos usados nas simulações das operações de secagem têm auxiliado muito o projeto, o desenvolvimento, a avaliação e a otimização de secadores. O modelo desenvolvido por Thompson, de natureza semiteórico, foi usado com sucesso na simulação de secagem de milho, apesar das simplificações admitidas no seu desenvolvimento. Modelos mais fundamentados, teoricamente, foram apresentados por Bakker-Arkema et al. (1978) e são amplamente aplicados na simulação de secagem de grãos e sementes. A modelagem matemática da secagem em camada fina também tem sido feita segundo modelos difusivos (VEGA-GÁLVEZ et al., 2008; SILVA et al., 2009a; SILVA et al., 2010).

Nos métodos modernos de desenvolvimento de novos tipos de secadores para sementes, é imprescindível a utilização de modelos matemáticos que possam descrever a taxa de transferência de massa que ocorre entre o ar de secagem e o produto (ERENTURK et al., 2004). Esses métodos possibilitam a simulação no processo de secagem sem que seja necessária a construção de protótipos de secadores, trazendo diversos benefícios, além da redução no tempo necessário para o seu desenvolvimento. Os modelos de simulação permitem avaliar o efeito de qualquer combinação das variáveis envolvidas no grau de uniformidade, no teor de água final das sementes, na eficiência do processo em termos energéticos e na relação custo/benefício dos diversos métodos de secagem.

Oliveira et al. (2012) ajustaram diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem dos grãos de milho (*Zea mays* L.), a fim de determinar e avaliar o

coeficiente de difusão efetivo, bem como obter a energia de ativação para o processo durante a secagem em diversas condições de ar. Dentre os modelos analisados, o de Newton apresentou o melhor ajuste para descrever o fenômeno de secagem. O coeficiente de difusão efetivo dos grãos de milho aumentou com a elevação da temperatura do ar e a relação entre o coeficiente de difusão efetivo e a temperatura de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresentam uma energia de ativação para a difusão líquida na secagem do milho.

Uma simulação numérica foi realizada por Silva et al. (2008), com o propósito de verificar a difusão da água em sólidos cilíndricos, avaliando as variáveis dos coeficientes de transporte e o raio do cilindro durante o processo. O modelo criado foi desenvolvido com a finalidade de simular a secagem de banana e arroz com casca, onde foram utilizados dados experimentais encontrados na literatura. Segundo os autores, ao se considerar, a difusividade de massa variável, os resultados obtidos são mais coerentes do que os resultados obtidos levando em consideração a difusividade de massa constante.

A representação matemática do processo de transferência de massa de diversos produtos agrícolas vem, há algum tempo, sendo estudada e utilizada na tentativa de prever os fenômenos que acontecem durante esse processo. A maioria dos modelos empregados para representar a transferência de massa dos produtos agrícolas foi desenvolvida negligenciando-se a contração volumétrica do produto durante o processo de desidratação (BROOKER et al., 1992).

A utilização de modelos matemáticos que consideram as características do sistema de transferência de massa em alimentos é uma ferramenta cada vez mais explorada pelos pesquisadores, sendo de grande utilidade para o cálculo do desenvolvimento eficiente de cada análise, tendo em vista a melhoria no processamento, redução de perdas e aumento da qualidade do produto final (DANTAS et al., 2011).

A simulação da secagem de grãos com condições externas constantes, para certo tempo de processamento, pode ser dividida em dois grupos principais: modelos teóricos e modelos empíricos. Segundo afirmações de Brooker et al. (1992), as relações empíricas têm-se mostrado as melhores opções para prever o processo de secagem, apesar de sua validade estar restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos. Os modelos empíricos de secagem apresentam uma relação direta entre o teor de umidade médio e o tempo de secagem; é um procedimento de abordagem com base em dados experimentais e na análise adimensional;

omitem os fundamentos do processo de secagem e seus parâmetros não têm significado físico; consequentemente, não oferecem uma visão apurada dos processos importantes que ocorrem durante o fenômeno, embora descrevam as curvas de secagem para determinadas condições experimentais (KEEY, 1972).

De acordo com Incropera e Dewitt (2001), os modelos empíricos, geralmente, têm como base a lei de resfriamento de Newton para transferência de calor por convecção. O primeiro deles, denominado modelo exponencial, resulta da simplificação da solução da equação de difusão para uma esfera.

Normalmente, os modelos empíricos descrevem bem a cinética de secagem, todavia não permitem a visualização da distribuição da umidade no interior do produto em um dado instante de tempo definido. Dessa forma, não é possível observar as regiões onde ocorrem as maiores tensões hídricas, consequentemente, não é possível obter controle das condições de secagem como forma de evitar qualquer tipo de dano ao produto durante o processo de secagem.

Diversos modelos são utilizados para estimar as curvas de secagem de produtos agrícolas, mesmo com limitações, os modelos empíricos são muito encontrados na literatura. Na Tabela 2.3, podem ser observadas algumas equações empíricas mais conhecidas.

Tabela 2.3 – Equações empíricas utilizadas para predizer a cinética de secagem.

Nº	Modelo	Equação
01	Verna	$\overline{M}^* = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-k_1 t)$
02	Midilli	$\overline{M}^* = a \exp(-kt^n) + bt$
03	Logarítimo	$\overline{M}^* = a \exp(-kt) + c$
04	Henderson e Pabis Modificado	$\overline{M}^* = a \exp(-kt) + b \exp(-k_o t) + c \exp(-k_1 t)$
05	Exponencial de Dois Termos	$\overline{M}^* = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$
06	Dois Termos	$\overline{M}^* = a \exp(-k_o t) + b \exp(-k_1 t)$

## 2.8 Equação de transporte

A equação geral de transporte, na forma infinitesimal para um volume elementar pode ser escrita da seguinte forma (ÖZIŞK, 1990; BIRD et al., 2001; MALISKA, 2004; SILVA, 2007):

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\lambda \vec{v} \Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S \quad (2.1)$$

em que:

$\Phi$  é a variável dependente de interesse;

$\lambda$  e  $\Gamma^\Phi$  são os coeficientes de transporte;

$\vec{v}$  é o vetor velocidade do meio;

$S$  é o termo fonte;

O primeiro termo da Equação (2.1) representa a variação temporal da grandeza de interesse, em um instante de tempo  $t$ , em um volume infinitesimal, sendo conhecido como termo transiente. Por outro lado, o segundo termo, denominado termo advectivo, indica o quanto a grandeza varia por unidade de tempo devido ao seu movimento junto com o meio. Ambos se movem com a velocidade  $\vec{v}$ . O terceiro termo representa a variação da grandeza na unidade de tempo por difusão (termo difusivo), enquanto o último termo, denominado de termo fonte, dá a taxa de geração da grandeza em um volume infinitesimal.

## 2.9 Equação de difusão

A equação de difusão pode ser obtida considerando o termo advectivo nulo, e, para isso, admite-se que  $|\vec{v}| = 0$ .

Dessa forma, a equação de difusão é muito utilizada para descrever vários processos difusivos, tais como: resfriamento ou aquecimento de certos tipos de congelamento, ou ainda, descrever o transporte de água em meios porosos na secagem (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992; BIRD et al., 2001).

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S \quad (2.2)$$

## 2.10 Solução analítica baseado em modelos difusivos

A solução da equação de difusão pode ser obtida analiticamente pelo método de separação de variáveis. É geralmente aplicado a corpos com geometrias simples como: placa infinita, paralelepípedos, cilindros e esferas. Normalmente, as condições de contorno são simplificadas, havendo a suposição de volume e difusividade constantes, com distribuição de umidade inicial uniforme, admitindo que o meio seja homogêneo e isotrópico. A vantagem deste método é que, por se tratar de um domínio contínuo, a variável de interesse é conhecida em qualquer ponto deste domínio e em qualquer instante de tempo.

A Equação (2.2) pode ser resolvida analiticamente com o objetivo de descrever o processo de secagem. Para tanto, será necessário definir as condições iniciais e de contorno e estabelecer algumas hipóteses, tais como:

- i) O mecanismo de transporte de água no interior do sólido é somente a difusão líquida;
- ii) A distribuição inicial de umidade deve ser uniforme;
- iii) As dimensões do sólido não variam durante a difusão de água;
- iv) O coeficiente convectivo de transferência de massa é constante durante a difusão de água;
- v) A difusividade efetiva da água não varia durante a difusão;

vi) O sólido é considerado homogêneo e isotrópico.

Podem-se determinar diversas soluções analíticas, considerando as suposições acima, para diversas geometrias através de separação de variáveis. As soluções para um sólido com o formato de paralelepípedo, com condições de contorno do primeiro e do terceiro tipo, serão apresentadas no próximo capítulo.

### **2.10.1 Soluções analíticas para a equação de difusão em coordenadas cartesianas**

Na literatura, diversos trabalhos utilizam a descrição da cinética de secagem de um produto, baseado em um modelo difusivo, que se dá através da solução de uma equação de difusão. Alguns trabalhos apresentam soluções analíticas para a equação de difusão, especialmente se a condição de contorno é do primeiro tipo (KULASIRI e WOODHEAD, 2005; RICARDEZ et al., 2005). No caso da condição de contorno do terceiro tipo, as soluções numéricas são frequentemente encontradas na literatura (BARONAS et al., 1999; LIU e SIMPSON, 1999; LIU et al., 2001; OLEK et al., 2005; OLEK e WERES, 2007).

Para realizar a secagem de produtos, é importante conhecer as suas características internas e externas, tais como: o gradiente de temperatura, teor de umidade e a geometria, avaliar o modelo de difusão, além da solução das equações de transferência de massa. Naturalmente, o tratamento matemático desse problema é muito complexo. Por esse motivo, faz-se necessário obter a solução da equação de difusão para tal produto, pois, para diferentes formas geométricas e/ou interações com o meio, existem diferentes soluções para a equação de difusão. É importante saber, que as soluções dependem ainda das condições de contorno consideradas no modelo, o que permite determinar a temperatura (ou teor de umidade) em um grão ou semente, em um dado instante de tempo. Para diminuir essa complexidade, simplificações são geralmente efetuadas nos modelos, dentre elas, assumir que o processo de secagem é independente dos efeitos dos gradientes de temperatura dentro do ponto material estudado.

Diversos trabalhos consideram que a condição de contorno do terceiro tipo possibilitam a consideração de uma resistência ao fluxo de massa na superfície do produto. Nesse sentido,

impõem-se a igualdade entre os fluxos da grandeza de interesse,  $\Phi$ , difusivo, no interior do domínio, e convectivo, em sua superfície (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992; BIRD et al., 2001).

Quando a solução analítica é proposta para a condição de contorno do terceiro tipo, a série que representa a solução em geral é expressa apenas pelo primeiro termo, e os parâmetros de processo são determinados por regressão (DINCER, 1998; JIAN-FENG et al., 2007). Este procedimento dispensa o cálculo das raízes através da equação característica, e funciona bem se o valor do número de Biot for pequeno. Se o número de Biot não for pequeno, mais termos da série são necessários para representar a cinética de secagem. Então, uma possível razão para a falta de soluções analíticas na literatura para problemas de difusão com condição de contorno do terceiro tipo pode ser atribuída à grande quantidade de raízes, que deve ser determinada de forma a cobrir todo o domínio do número de Biot, quando são considerados muitos termos da série. Convém observar que, se  $Bi \rightarrow \infty$  a condição de contorno adequada para descrever o processo difusivo será do primeiro tipo.

O número de Biot define a relação entre a resistência interna e a resistência externa à transferência de massa. Na situação em que  $Bi \rightarrow \infty$ , diz-se que a resistência externa ao fenômeno de transferência de massa é desprezível em face ao fenômeno difusivo que está se processando no meio em que ocorre o transporte de matéria.

## 2.11 Método numérico para solução da equação de difusão

Com o avanço tecnológico e com surgimento de novos computadores com grande capacidade de memória e velocidade de processamento cada vez maior, aliado ao desenvolvimento de novos *softwares* que facilitam a solução de um determinado problema numérico utilizando-se de técnicas computacionais, o emprego de computadores vem se tornando cada vez mais crescente entre os pesquisadores. O cálculo computacional constitui uma ferramenta poderosa para projetos e, em particular, para a solução de problemas difusivos.

Existem grandes vantagens na solução analítica de um problema difusivo comparado com a solução numérica, visto que a obtenção da solução exata, geralmente se dá de forma analítica para problemas difusivos envolvendo situações especiais, muitas vezes fora da realidade física. Entretanto uma vantagem evidente da solução numérica em relação à analítica está na possibilidade de aproximar o modelo objeto de estudo para as condições físicas reais.

Quando a representação matemática do problema exige equações não lineares ou a utilização de geometrias complexas, a solução analítica em geral se torna bastante complexa e de difícil obtenção. Assim, nas últimas décadas, o desenvolvimento de métodos numéricos se tornou cada vez mais rápido e preciso e tem sido um dos principais objetivos dos pesquisadores.

Diferentes métodos são usados para solucionar a equação de difusão numericamente, tais como: elementos finitos, diferenças finitas e volumes finitos. Discussões sobre cada um desses métodos podem ser encontradas nos trabalhos de Patankar (1980), Shih (1984), Maliska (2004), Minkowicz et al. (1988), Rafiee et al. (2008) e Silva et al. (2012).

### **2.11.1 Método dos Elementos Finitos (MEF)**

Nesse método, tenta-se obter uma solução aproximada que reduza a um mínimo o erro na aproximação da equação. A solução do problema discreto deve pertencer a um espaço de funções construído pelos valores da função variando de uma dada maneira, por exemplo, linearmente ou quadraticamente, entre os valores dos pontos nodais. Os pontos nodais, ou nós, são pontos típicos dos elementos como os vértices, os pontos médios dos lados, os pontos médios do elemento, entre outros (CAMPOS, 2006).

No Método dos Elementos Finitos (MEF), o domínio de integração é dividido em um número finito de pequenas regiões denominadas de elementos finitos, que mantêm as mesmas propriedades do domínio contínuo, e cada elemento é definido como “nó”. Essa formulação serve para aproximar a solução dentro de cada elemento ou subdomínio. A função deve conter coeficientes desconhecidos que serão determinados de forma a minimizar o erro na solução. Esses coeficientes devem ser escritos em função dos valores da grandeza em estudo, obtidos para os nós. Esses coeficientes devem ser escritos em função dos valores da grandeza em estudo, obtidos para os nós. As funções aproximadas mais comuns são os polinômios, que devem ser determinados utilizando métodos diretos ou iterativos para a solução de sistemas lineares (SILVA, L. 2012).

Os pontos nodais devem ser considerados na escolha do Método dos Elementos Finitos, nas seguintes situações:



- i) Quando a solução é conhecida para qualquer ponto do domínio, graças ao conceito da função de interpolação;
- ii) Na solução da equação na forma integral, ou seja, a equação diferencial é satisfeita segundo algum critério de minimização do resíduo;
- iii) Nos sistemas matriciais obtidos, em geral, simétricos, o que simplifica a sua solução;
- iv) Na implementação computacional.

### 2.11.2 Método das Diferenças Finitas (MDF)

No Método das Diferenças Finitas (MDF), o domínio do problema, contínuo, é substituído por uma série de pontos discretos, nos quais são calculadas as variáveis de interesse do problema. A inserção computacional é simples, pois é resolvida na forma diferencial, como a aproximação numérica dos operadores. Portanto o método das diferenças finitas é um método de solução de equação diferencial, ou sistemas de equações diferenciais que se baseia na aproximação de derivadas por diferenças finitas, ou seja, consiste na substituição do operador diferencial pelo seu correspondente numérico, e baseia-se na expansão da função solução em série de Taylor (MALISKA, 2004).

Uma grande desvantagem deste método consiste na solução de problemas onde exista uma mudança brusca da velocidade no meio, como por exemplo, interfaces entre líquido e sólido, que torna o problema bastante instável, como descrito por Virieux (1986).

De tal maneira, que tanto o MDF, como o MEF não trabalham com volumes de controle e sim com pontos da malha, e, conseqüentemente, não são conservativos em nível discreto (BORTOLI, 2000; MALISKA, 2004).

### 2.11.3 Método dos Volumes Finitos (MVF)

No Método dos Volumes Finitos (MVF), o domínio físico em estudo é dividido em um número de subdomínio de volumes elementares chamados de volumes de controle ou volumes finitos. A discretização é realizada integrando todos os termos da equação que descreve o fenômeno, sobre cada volume de controle, no espaço e no tempo. A solução resultante implica que a conservação da grandeza de interesse é satisfeita em qualquer volume de controle e, conseqüentemente, em todo domínio físico estudado (MALISKA, 2004; CADÉ et al., 2005, FARIAS, 2011).

Normalmente um dos métodos mais empregados na discretização de equações diferenciais parciais é o MVF. Isto se deve ao fato deste não apresentar problemas de instabilidade ou convergência, garantindo que em cada volume discretizado, a propriedade em questão obedeça à lei da conservação, dando uma característica conservativa. Esse método é largamente utilizado na resolução de problemas envolvendo transferência de calor e/ou massa, e em mecânica dos fluídos. Diversos trabalhos utilizam esse método, dentre os quais podem ser citados: Lima (1999), Wu et al. (2004), Nascimento et al. (2005), Silva, (2007), Silva et al. (2012).

Carmo (2004) analisou vários modelos numéricos para simular o fenômeno de difusão em sólidos esferoidais oblatos. A partir das soluções numéricas, foi utilizado o método dos volumes finitos, com uma formulação totalmente implícita. A equação de difusão foi discretizada e resolvida considerando o fenômeno com e sem encolhimento. A aplicação dos modelos citados foi verificada para descrever a secagem de lentilhas, e os resultados obtidos, comparados com os dados experimentais.

Para se verificar a influência da secagem sobre a qualidade da soja, Rafiee et. al. (2008), estudaram a transferência difusiva de massa em corpos individuais, empregando o método de elementos finitos. Eles apresentaram um modelo matemático bidimensional escrito em coordenadas cartesianas, avaliando a condição de simetria do corpo e sem considerar o encolhimento ocorrido durante a secagem. Os dados simulados foram comparados com os dados experimentais obtidos a partir de experiências de secagem realizadas em camada delgada para grãos de soja.

#### 2.11.4 Formulações para os métodos numéricos

Para resolver a equação de difusão pelo método numérico é necessário realizar a discretização da equação diferencial que descreve o processo em estudo, através da aproximação das derivadas de funções que envolvem a variável de interesse,  $\Phi$ , em relação às variáveis de posição. O instante de tempo no qual o cálculo de tais derivadas espaciais é feito define a formulação do método numérico utilizado. A interpolação no tempo pode ser feita por uma função da forma:

$$\Phi^\theta = \theta\Phi + (1 - \theta)\Phi^0 \quad (2.3)$$

em que  $\Phi^\theta$  representa o valor de  $\Phi$ , no instante  $\theta$ , que será utilizado no cálculo das derivadas espaciais. Na mesma expressão,  $\Phi^1$ , denota o valor da variável no estepe de tempo atual (final do intervalo de tempo) e  $\Phi^0$  corresponde ao valor de  $\Phi$  no início do intervalo de tempo. A Figura 2.6 ilustra as possibilidades de interpolação.

Considerando-se  $\theta = 0$ , tem-se a formulação explícita, na qual os valores de  $\Phi$ , nas vizinhanças do ponto nodal P, são avaliados no início do intervalo de tempo e, portanto, já são conhecidos. No final da discretização, no caso do método dos volumes finitos, encontra-se uma equação algébrica para cada volume de controle, que, no entanto, não são acopladas e podem ser resolvidas, uma a uma, tantas vezes quantos forem os níveis de tempo desejados.

Nesta formulação a variável de interesse para expressar as derivadas espaciais é avaliada no instante (t) do intervalo ( $\Delta t$ ) e logo seu valor já é conhecido ( $\Phi = \Phi^0$ ). Logo, a variável de interesse para cada volume de controle pode ser determinada para o novo nível de tempo ( $t + \Delta t$ ), sem a necessidade de que um sistema de equações seja resolvido. Esta formulação tem uma limitação com relação à magnitude do intervalo de tempo que deve ser adotado para avançar no tempo, de forma a manter a estabilidade da solução numérica (SILVA, L. 2012).

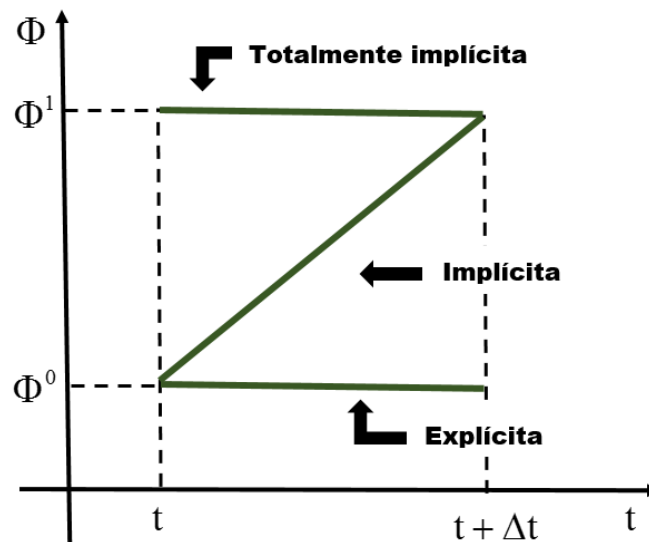


Figura 2.6 – Formulações de interpolação no tempo (Adaptado de MALISKA, 2004).

Há disponível, na literatura, uma quantidade substancial de trabalhos que utilizam a formulação explícita para resolver a equação de difusão numericamente, dos quais podemos citar: Pirozzi e Amendola (2002), Póvoas et al. (2002), Ismail et al. (2008), Prakotmak et al. (2010) e Thuwapanichayanan et al. (2011).

Verifica-se que, para  $0 < \theta < 1$ , tem-se a formulação implícita, no qual os valores de utilizados nos cálculos das derivadas espaciais são tomados como uma média ponderada entre seus valores no início e no final do intervalo de tempo. Maliska (2004), ressalta que o método mais conhecido com essa formulação é o de Crank-Nicolson, no qual  $\Phi$  é tomado como a média aritmética de seus valores no início e no fim do intervalo de tempo.

Fazendo-se  $\theta = 1$ , obtém-se a formulação totalmente implícita. Neste caso, os valores de  $\Phi$ , usados no cálculo das derivadas espaciais, são aqueles do final do intervalo de tempo e, portanto, não são conhecidos. Tem-se, ao final do processo de discretização, para o método dos volumes finitos, um sistema de equações algébricas, no qual cada equação provém de um volume de controle e se encontram acopladas (MALISKA, 2004).

A principal característica desta formulação consiste no fato dela ser incondicionalmente estável para qualquer intervalo de tempo estipulado. Deste modo, pode-se atingir o regime permanente dando um único salto no nível de tempo, atribuindo ao intervalo de tempo um valor suficientemente grande (SILVA, C. 2012).

## 2.12 Linguagem de programação Fortran

A linguagem de programação globalmente conhecida como FORTRAN foi desenvolvida a partir da década de 1950. O nome é um acrônimo da expressão “*IBM Mathematical Formula Translation System*”. O desenvolvimento no ambiente Fortran deve-se a simplificação na escrita de muitos problemas matemáticos, possibilitando aos desenvolvedores uma facilidade para solução de equações lineares complexas, com rapidez e eficiência.

Esse código computacional é a matriz de todas as linguagens científicas de computadores. No começo tinha somente a intenção de traduzir equações científicas para códigos de computadores e, foi neste sentido um programa verdadeiramente revolucionário.

Antes do Fortran todos os programas de computadores eram lentos e originavam muitos erros. Na primeira versão, o FORTRAN I, lançada entre 1954 e 1957, a linguagem era muito simples em comparação com as versões mais modernas. Entre outras coisas, continha somente às declarações de variáveis para os tipos inteiro (INTEGER) e real (REAL) e também não havia sub-rotinas. Durante este período percebeu-se diversos erros, que forçou a IBM lançar o FORTRAN II em 1958.

Um avanço ocorreu com o lançamento da versão FORTRAN IV, em 1962, que permitiu os cientistas utilizarem pelos próximos 15 anos. Com isso, em 1966 o Fortran adotou uma padronização, a *American National Standards Institute* – “Instituto Nacional Americano de Padronização” (ANSI) e passou a ser chamado de FORTRAN 66.

As dificuldades nas versões anteriores foram parcialmente resolvidas pela publicação de um novo padrão, em 1978, conhecido como Fortran 77. Ele incluía diversos novos recursos que eram baseados em extensões comerciais ou pré-processadores e era, portanto, não um subconjunto comum de dialetos existentes, mas sim um novo dialeto por si só.

O período de transição entre o Fortran 66 e o Fortran 77 foi muito mais longo do que deveria devido aos atrasos na elaboração de novas versões dos compiladores e os dois padrões coexistiram durante um intervalo de tempo considerável, que se estendeu até meados da década de 80.

Eventualmente, os fabricantes de compiladores passaram a liberá-los somente com o novo padrão, o que não impediu o uso de programas escritos em Fortran 66, uma vez que o Fortran 77 permitia este código antigo por compatibilidade. Contudo, diversas extensões não foram mais permitidas, uma vez que o padrão não as incluiu na sua sintaxe.

O Fortran 90/95 é uma evolução da versão 77, desenvolvido com o objetivo de se obter o máximo de eficiência de um código onde novos comandos permitam explorar o paralelismo e estender um conjunto de operações com vetores. Novas características foram acrescentadas e algumas outras do Fortran 77 foram consideradas obsoletas e até substituídas.

A versão 90 traz um novo formato de edição com características interessantes, tais como:

- i) Formato livre, sem colunas reservadas;
- ii) As linhas podem conter até 132 colunas;
- iii) Possibilidade de declarações múltiplas em uma linha;
- iv) Possibilidade de comentários na linha da declaração;
- v) Não é sensível a letras maiúsculas e minúsculas;
- vi) Possibilidade de nomes longos com até 31 caracteres.

A resolução de problemas envolvendo operações com matrizes, o paralelismo pode ser expresso através do uso de novos operadores que permitem o seu seccionamento. A notação do Fortran 90/95 permite que operações aritméticas possam ser aplicadas diretamente a matrizes e vetores. Estas características tornam a versão recomendável para o desenvolvimento de aplicações científicas e de engenharia.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os modelos matemáticos necessários para o desenvolvimento das ferramentas a serem utilizadas para a simulação do transporte de massa em sólidos porosos com o formato de paralelepípedo. Também são definidos os testes para a validação das ferramentas desenvolvidas, bem como são estabelecidos os critérios referentes à metodologia experimental para a secagem dos grãos de milho de variedade 1051.

#### 3.1 Solução analítica para sólidos com formato de paralelepípedo

A Equação de difusão de massa em um sólido retangular com formato de paralelepípedo, parte da Equação de difusão (2.2) escrita na sua forma geral.

Assumindo que:  $\Phi = M$  (teor de umidade em base seca),  $\Gamma^\Phi = D_{ef}$  (difusividade efetiva da água),  $\lambda = 1$  e  $S = 0$  a Equação de difusão (2.2) passa a ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \nabla M) \quad (3.1)$$

A Equação (3.1) é conhecida como a equação de difusão de massa que, escrita em coordenadas é dada por:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{ef} \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{ef} \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{ef} \frac{\partial M}{\partial z} \right) \quad (3.2)$$

O grão estudado deve apresentar a forma de um paralelepípedo retangular, conforme apresentado na Figura 3.1.

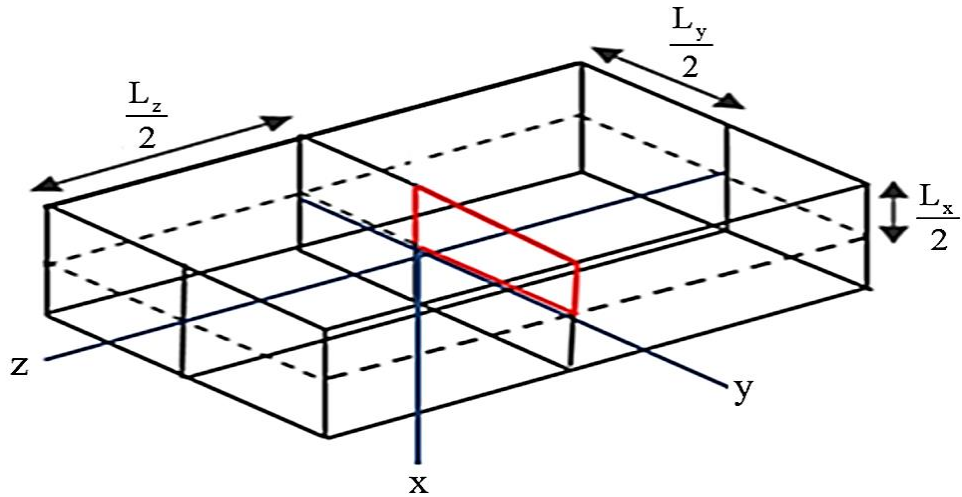


Figura 3.1 – Paralelepípedo destacando em um plano vertical xy, na posição  $z = 0$ , onde a distribuição de água foi examinada.

A Equação (3.2) pode ser resolvida analiticamente analisando as seguintes suposições:

- As dimensões do grão não variam durante a difusão da água;
- A difusão líquida é o único mecanismo de transporte de água dentro do sólido;
- A distribuição inicial do teor de umidade deve ser uniforme;
- O grão é considerado homogêneo e isotrópico;
- A difusividade efetiva da água não varia durante o processo;

### 3.2 Solução analítica tridimensional para condição de contorno do terceiro tipo

Para um paralelepípedo retangular, a condição de contorno convectiva é obtida impondo a igualdade entre o fluxo difusivo no interior da superfície e o fluxo convectivo nas vizinhanças da mesma superfície, conforme será apresentado a seguir:

$$-D_{ef} \frac{\partial M(x, y, z, t)}{\partial x} \bigg|_{x=\pm \frac{L_x}{2}} = h \left( M(x, y, z, t) \bigg|_{x=\pm \frac{L_x}{2}} - M_{eq} \right) \quad (3.3)$$



$$-D_{ef} \frac{\partial M(x, y, z, t)}{\partial y} \bigg|_{y=\pm \frac{L_y}{2}} = h \left( M(x, y, z, t) \bigg|_{y=\pm \frac{L_y}{2}} - M_{eq} \right) \quad (3.4)$$

$$-D_{ef} \frac{\partial M(x, y, z, t)}{\partial z} \bigg|_{z=\pm \frac{L_z}{2}} = h \left( M(x, y, z, t) \bigg|_{z=\pm \frac{L_z}{2}} - M_{eq} \right) \quad (3.5)$$

onde:

- $D_{ef}$  é a difusividade efetiva de massa;
- $h$  é o coeficiente de transferência convectivo de massa;
- $M(x, y, z, t)$  é o teor umidade na posição  $(x, y, z)$  dentro do paralelepípedo no instante de tempo  $t$ ;
- $M_{eq}$  é o teor de umidade de equilíbrio;
- $L_x, L_y$  e  $L_z$  são os comprimentos das arestas do paralelepípedo ao longo dos eixos  $x, y$  e  $z$ ;

Considera-se um grão de milho na forma de um paralelepípedo retangular homogêneo com teor de umidade inicial  $M_o$  e condição de contorno definida pelas Equações (3.3, 3.4 e 3.5), a solução analítica  $M(x, y, z, t)$  da equação (3.2) é obtida por separação de variáveis (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992):

$$M(x, y, z, t) = M_{eq} + (M_o - M_{eq}) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_n A_m A_k \cos \left( \mu_n \frac{x}{L_x/2} \right) \times \cos \left( \mu_m \frac{y}{L_y/2} \right) \times \cos \left( \mu_k \frac{z}{L_z/2} \right) \times \exp \left[ - \left( \frac{\mu_n^2}{\left( L_x/2 \right)^2} + \frac{\mu_m^2}{\left( L_y/2 \right)^2} + \frac{\mu_k^2}{\left( L_z/2 \right)^2} \right) D_{ef} t \right] \quad (3.6)$$

onde:

$$A_j = \frac{4\text{sen}\mu_j}{2\mu_j + \text{sen}(2\mu_j)} \quad (3.7)$$

Em que:  $\mu_j$  são as raízes da equação característica para a parede infinita, dada por:

$$\cot \mu_j = \frac{\mu_j}{\text{Bi}} \quad (3.8)$$

O parâmetro Bi é o número de Biot, definido como:

$$\text{Bi} = \frac{hL/2}{D_{\text{ef}}} \quad (3.9)$$

onde L é um comprimento característico.

Analisando a Equação (3.6), verifica-se que o valor do teor de umidade pode ser obtido para qualquer posição (x, y, z) em qualquer instante de tempo t, isto é, pode-se conhecer o perfil de  $M(x, y, z, t)$  no interior do grão. No entanto, em muitos casos de interesse, necessita-se conhecer o valor do teor de umidade no grão inteiro, ao longo do processo. Para esses casos, a expressão para o teor de umidade médio no tempo t pode ser escrita na forma:

$$\bar{M}(t) = \frac{1}{V} \int M(x, y, z, t) dV \quad (3.10)$$

em que V é o volume do paralelepípedo retangular.

Substituindo a Equação (3.6) na Equação (3.10) e realizando-se a integração, o teor de umidade médio no intervalo de tempo  $t$ ,  $\overline{M}(t)$ , é dado por:

$$\overline{M}(t) = M_{eq} + (M_o - M_{eq}) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} B_n B_m B_k \exp \left[ - \left( \frac{\mu_n^2}{\left( \frac{L_x}{2} \right)^2} + \frac{\mu_m^2}{\left( \frac{L_y}{2} \right)^2} + \frac{\mu_k^2}{\left( \frac{L_z}{2} \right)^2} \right) D_{ef} t \right] \quad (3.11)$$

onde os coeficientes  $B_n$ ,  $B_m$  e  $B_k$  são dados por:

$$B_j = \frac{2Bi^2}{\mu_j^2 (Bi^2 + Bi + \mu_j^2)} \quad (3.12)$$

Considerando a situação física, é razoável admitir o mesmo valor de  $h$  em todas as faces do paralelepípedo, e esta suposição resulta em:

$$Bi_1 = \frac{h \left( \frac{L_x}{2} \right)}{D_{ef}} \quad (3.13)$$

$$Bi_2 = Bi_1 \frac{L_y}{L_x} \quad (3.14)$$

$$Bi_3 = Bi_1 \frac{L_z}{L_x} \quad (3.15)$$

A Equação (3.8) é uma equação transcendental que pode ser escrita na seguinte forma:

$$\mu_j \operatorname{sen} \mu_j - Bi \cos \mu_j = 0 \quad (3.16)$$

Convém observar que, se a condição de contorno adequada ao processo difusivo for de primeiro tipo, basta impor,  $Bi \rightarrow \infty$  na solução apresentada anteriormente. Neste caso, as Equações (3.12) e (3.16) são expressas respectivamente por:

$$B_j = \frac{2}{\mu_j^2} \quad (3.17)$$

$$\mu_j = \frac{(2j+1)\pi}{2} \quad (3.18)$$

### 3.3 Otimizador para condição de contorno prescrita (primeiro tipo)

A condição de contorno do primeiro tipo, também conhecida como condição de contorno prescrita, pode ser utilizada para determinar a difusividade em um processo de difusão de água com dados experimentais conhecidos, para diversas geometrias, tais como: parede infinita, cilindro infinito, esfera, cilindro finito e paralelepípedo. Para essa condição de contorno, o transporte da água é descrito pela equação de difusão, e a solução analítica é acoplada a um otimizador que varre o domínio da difusividade. Estabelecida a condição, o valor médio do teor de umidade  $\bar{M}$  no instante  $t$  só depende da difusividade efetiva de massa  $D_{ef}$ . Assim, para um conjunto de dados experimentais, a função objetivo para este problema inverso é o qui-quadrado, definido da seguinte forma (BEVINGTON e ROBINSON, 1992; SILVA et al., 2009b).

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} \left[ \overline{M}_i^{\text{exp}} - \overline{M}_i^{\text{ana}}(D_{\text{ef}}) \right]^2 \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (3.19)$$

onde:

$\overline{M}_i^{\text{exp}}$  é o teor de umidade médio experimental;

$\overline{M}_i^{\text{ana}}(D_{\text{ef}})$  é o teor de umidade médio obtido pelo método analítico;

$\sigma_i$  é o desvio padrão do teor de umidade experimental;

$D_{\text{ef}}$  é a difusividade efetiva de massa;

$N_p$  é o número de pontos experimentais;

Para cada conjunto de dados experimentais, um " $D_{\text{ef}}$ " ótimo é determinado através da minimização de  $\chi^2$ .

### 3.4 Otimizador para condição de contorno convectiva (terceiro tipo)

Para a condição de contorno convectiva, a Equação (3.19) pode ser utilizada na descrição da cinética de secagem de grãos de milho com forma de paralelepípedo retangular. Dessa forma, a função objetivo a ser minimizada passa a ser expressa da seguinte forma (SILVA et al., 2010):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} \left[ \overline{M}_i^{\text{exp}} - \overline{M}_i^{\text{ana}}(D_{\text{ef}}, Bi) \right]^2 \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (3.20)$$

A Equação (3.20) depende da difusividade efetiva da água e do número de Biot para transferência de massa ou, equivalentemente, do coeficiente de transferência convectivo de massa  $h$ .

No entanto, para um número de Biot previamente estipulado, essa equação é função somente da difusividade efetiva de massa. Assim, o otimizador desenvolvido por Silva e Silva (2009b), pode ser aplicado para minimização da Equação (3.20), determinando um valor ótimo para a difusividade efetiva supondo um número de Biot especificado. Admitindo que a difusividade efetiva de massa  $D_{ef}$  e o coeficiente de transferência convectivo da massa  $h$  sejam independentes entre si, o processo de otimização pode ser repetido para todos os 469 números de Biot estipulados, cobrindo o domínio de 0 a 200. A seguir a Tabela 3.1 mostra as seis primeiras raízes da Equação (3.16), para alguns números de Biot.

Tabela 3.1 – Algumas raízes da equação característica para vários números de Biot.

Bi	$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$\mu_3$	$\mu_4$	$\mu_5$
0,001	0,031618	3,14191	6,28334	9,42488	12,5665	15,7080
0,400	0,593242	3,26355	6,34613	9,46700	12,5981	15,7334
1,000	0,860334	3,42562	6,43730	9,52933	12,6453	15,7713
10,00	1,428870	4,30580	7,22811	10,2003	13,2142	16,2594
200,0	1,562980	4,68895	7,81493	10,9409	14,0669	17,1930

Fonte: Silva et al. (2013a)

Após varrer todos os números de Biot, o menor qui-quadrado dentre os 469 mínimos é identificado. Desde que o domínio inteiro para o número de Biot é varrido, não é necessário indicar valores iniciais ou intervalos de pesquisa para determinação dos valores ótimos de  $D_{ef}$  e Bi e, conseqüentemente, para o coeficiente de transferência convectivo da massa  $h$ .

Para secagem de grãos de milho com a forma de paralelepípedo, a expressão para o número de Biot foi definida pela Equação (3.13). Para números de Biot entre 0 e 10, somente 16 raízes da Equação (3.16) foram usadas e, para valores maiores que 10, foram utilizadas 25 raízes nos cálculos efetuados.

Para números de Biot expressos pelas Equações (3.14) e (3.15), as raízes da equação característica foram calculadas por interpolação linear, usando valores disponíveis.

### 3.4.1 Verificação do número de termos usados na série

Com a finalidade de se estabelecer o número adequado de termos usados na série, deve ser observado que o maior erro devido ao truncamento da série ocorre em  $t = 0$ . Neste caso a Equação (3.11) pode ser reescrita para os números de termos determinados, ao invés de infinitos termos, conforme pode ser observado na Equação (3.21).

$$\bar{M}^*(0) = \frac{\bar{M}(0) - M_{eq}}{M_o - M_{eq}} = \sum_{n=1}^{nt} \sum_{m=1}^{nt} \sum_{k=1}^{nt} B_n B_m B_k \quad (3.21)$$

Verifica-se, a partir da Equação (3.21), que para  $nt \rightarrow \infty$ ,  $\bar{M}^*(0) = 1$ , não há erro de truncamento. Entretanto, para um valor finito de  $nt$ ,  $\bar{M}^*(0)$  depende do número de Biot. É possível identificar a dependência entre  $\bar{M}^*(0)$  e  $nt$  para vários números de Biot na Tabela 3.2. Por simplicidade, todas as dimensões do grão de forma aproximada de um paralelepípedo foram consideradas iguais a  $L$ , o que pressupõe em  $Bi_1 = Bi_2 = Bi_3$ .

Tabela 3.2 – Valores  $\bar{M}^*(0)$  como função de  $nt$  para vários números de Biot.

Biot	1 termo	2 termos	5 termos	10 termos	16 termos	25 termos
0,001	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,400	0,9912	0,9992	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
1,000	0,9589	0,9955	0,9998	1,0000	1,0000	1,0000
10,00	0,6683	0,8799	0,9816	0,9978	0,9995	0,9998
200,0	0,5405	0,7413	0,8963	0,9532	0,9747	0,9871

Observando a Tabela 3.2 e realizando uma inspeção visual dos dados referentes ao número de Biot é possível afirmar que, para números de Biot pequenos, poucos termos da série são suficientes para obter resultados com erros desprezíveis devido ao truncamento. Observa-se na linha 1 da referida tabela que, para  $Bi = 0,001$ , somente 1 termo é necessário para obter  $\bar{M}^*(0) = 1,0000$ . Quando o número de Biot cresce, torna-se necessário aumentar o número de termos para obter erros de truncamento desprezíveis.

### 3.5 Solução numérica para sólido com formato de paralelepípedo

Nesta seção serão apresentados a solução numérica para sólidos porosos com formato de paralelepípedo.

#### 3.5.1 Solução numérica tridimensional em coordenadas cartesianas

A discretização da equação da difusão de massa em coordenadas cartesianas foi realizada utilizando o método dos volumes finitos, que se fundamenta no balanço de fluxos da grandeza de interesse, em um determinado volume de controle e intervalo de tempo. Esse método foi utilizado considerando a formulação totalmente implícita, isto é, o princípio se baseia na integração da equação de difusão, no espaço e no tempo, sendo que nas derivadas espaciais, a variável de interesse  $M$  foi substituída no instante atual.

Para solução da Equação (3.2), é necessário definir os volumes de controle, partindo do domínio contínuo para obter o domínio discreto dividido numa malha com vinte e sete tipos distintos de volume de controle, quanto à localização na malha, conforme se observa na Figura 3.2.

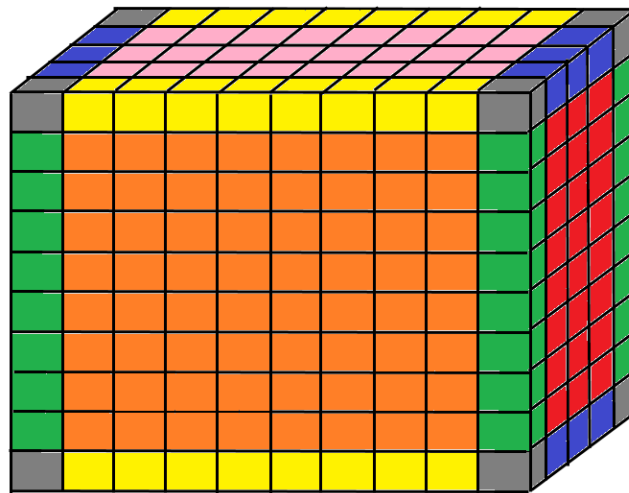


Figura 3.2 – Malha tridimensional com 27 tipos distintos de volumes de controle.

A seguir, será apresentada a discretização da equação de difusão tridimensional, para uma formulação totalmente implícita e condição de contorno do terceiro tipo, conforme Equação (3.2).



Realizando a integração da Equação (3.2) no espaço  $(\Delta x \Delta y \Delta z)$  e no tempo  $(\Delta t)$ , obtém-se a equação:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_v \frac{\partial M}{\partial t} dx dy dz dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_v \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{ef} \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{ef} \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{ef} \frac{\partial M}{\partial z} \right) \right] dx dy dz dt \quad (3.22)$$

Resolvendo a integral da equação (3.22), obtém-se:

$$\begin{aligned} (M_p - M_p^0) \Delta x \Delta y \Delta z = & D_{ef} \left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_e \Delta y \Delta z \Delta t - D_{ef} \left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_w \Delta y \Delta z \Delta t + D_{ef} \left. \frac{\partial M}{\partial y} \right|_n \Delta x \Delta z \Delta t \\ & - D_{ef} \left. \frac{\partial M}{\partial y} \right|_s \Delta x \Delta z \Delta t + D_{ef} \left. \frac{\partial M}{\partial z} \right|_f \Delta x \Delta y \Delta t - D_{ef} \left. \frac{\partial M}{\partial z} \right|_b \Delta x \Delta y \Delta t \end{aligned} \quad (3.23)$$

em que o sobrescrito zero significa que o termo deve ser avaliado no tempo anterior ao tempo de interesse, enquanto os termos sem sobrescrito são avaliados no tempo de interesse.

### 3.5.2 Discretização para volumes de controle internos

Na Figura 3.3, é observado que o volume de controle interno possui vizinhos a leste (E), a oeste (W), ao norte (N), ao sul (S), na frente (F) e atrás (B).

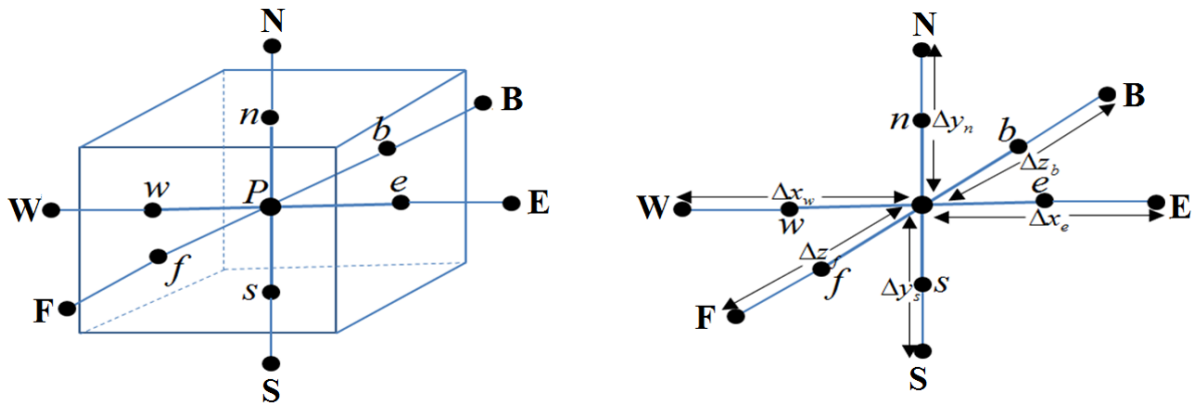


Figura 3.3 – Volume de controle interno de ponto nodal P e seus vizinhos.

Realizando as aproximações, obtêm-se:

$$\begin{aligned}
 D_{ef} \frac{\partial M}{\partial x} \Big|_e &\simeq D_{efe} \frac{M_E - M_P}{\Delta x_e}; & D_{ef} \frac{\partial M}{\partial x} \Big|_w &\simeq D_{efw} \frac{M_P - M_W}{\Delta x_w} \\
 D_{ef} \frac{\partial M}{\partial y} \Big|_n &\simeq D_{efn} \frac{M_N - M_P}{\Delta y_n}; & D_{ef} \frac{\partial M}{\partial y} \Big|_s &\simeq D_{efs} \frac{M_P - M_S}{\Delta y_s} \\
 D_{ef} \frac{\partial M}{\partial z} \Big|_f &\simeq D_{eff} \frac{M_F - M_P}{\Delta z_f}; & D_{ef} \frac{\partial M}{\partial z} \Big|_b &\simeq D_{efb} \frac{M_P - M_B}{\Delta z_b}
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

Substituindo as aproximações (3.24) na Equação (3.22) e dividindo todos os termos da equação por  $\Delta t$ , obtêm-se:

$$\begin{aligned}
 (M_P - M_P^0) \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} &= \frac{D_{efe} \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} M_E - \frac{D_{efe} \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} M_P - \frac{D_{efw} \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} M_P + \frac{D_{efw} \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} M_W \\
 &+ \frac{D_{efn} \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} M_N - \frac{D_{efn} \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} M_P - \frac{D_{efs} \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} M_P + \frac{D_{efs} \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} M_S + \frac{D_{eff} \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} M_F \\
 &- \frac{D_{eff} \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} M_P + \frac{D_{efb} \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} M_B - \frac{D_{efb} \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} M_P
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

Escrevendo a Equação (3.25) em função de  $M$  e reorganizando os termos da equação, obtém-se:

$$\begin{aligned}
 &\left( \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{D_{efe} \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} + \frac{D_{efw} \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} + \frac{D_{efn} \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} + \frac{D_{efs} \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} + \frac{D_{eff} \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} + \frac{D_{efb} \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} \right) M_P \\
 &= \frac{D_{efe} \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} M_E + \frac{D_{efw} \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} M_W + \frac{D_{efn} \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} M_N + \frac{D_{efs} \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} M_S + \frac{D_{eff} \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} M_F \\
 &+ \frac{D_{efb} \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} M_B + M_P^0 \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t}
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

A Equação (3.26) pode ser escrita da seguinte forma:

$$A_p M_p = A_e M_e + A_w M_w + A_n M_n + A_s M_s + A_f M_f + A_b M_b + B \quad (3.27)$$

onde:

$$A_p = \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{D_{efe} \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} + \frac{D_{efw} \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} + \frac{D_{efn} \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} + \frac{D_{efs} \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} + \frac{D_{eff} \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} + \frac{D_{efb} \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} \quad (3.28)$$

$$A_e = \frac{D_{efe} \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} \quad (3.29)$$

$$A_w = \frac{D_{efw} \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} \quad (3.30)$$

$$A_n = \frac{D_{efn} \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} \quad (3.31)$$

$$A_s = \frac{D_{efs} \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} \quad (3.32)$$

$$A_f = \frac{D_{eff} \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} \quad (3.33)$$

$$A_b = \frac{D_{efb} \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} \quad (3.34)$$

$$B = M_p^0 \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \quad (3.35)$$

### 3.5.3 Discretização para o volume de controle oeste-norte-atrás

A Figura 3.4 apresenta os volumes de controle com as fronteiras com o meio externo, a oeste (W), a norte (N) e a atrás (B).

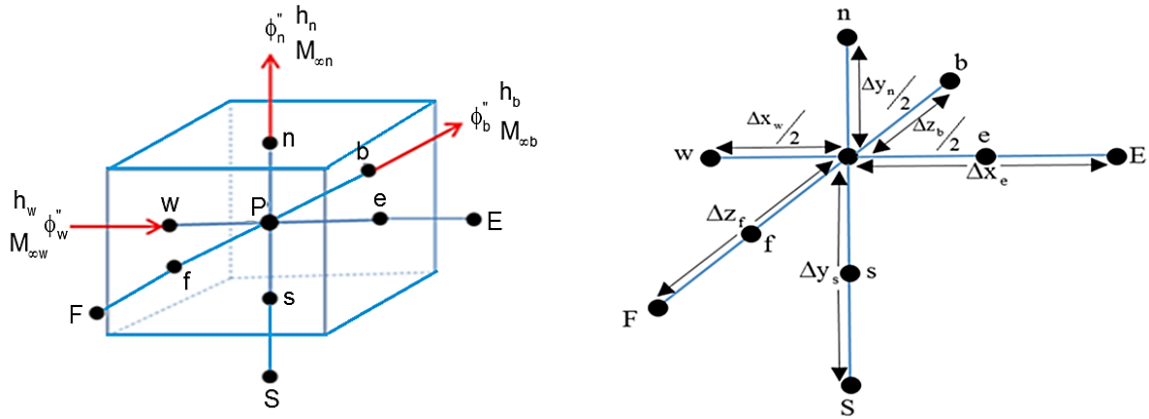


Figura 3.4 – Volume de controle oeste (W) - norte (N) - atrás (B).

Para encontrar as expressões para o fluxo difusivo e convectivo, utilizando-se da condição de contorno do terceiro tipo, precisa-se das seguintes equações:

Fluxo difusivo a oeste: 
$$\phi_w'' = -D_{efw} \frac{M_P - M_w}{\frac{\Delta x_w}{2}} \quad (3.36)$$

Fluxo convectivo a oeste: 
$$\phi_w'' = h_w (M_{\infty w} - M_w) \quad (3.37)$$

Igualando-se a Equação (3.36) com a Equação (3.37) obtém-se:

$$M_w = \frac{M_{\infty w} + \frac{2D_{efw} M_P}{h_w \Delta x_w}}{1 + \frac{2D_{efw}}{h_w \Delta x_w}} \quad (3.38)$$

Substituindo-se a Equação (3.38) na Equação (3.37), obtém-se:

$$\phi_w'' = \frac{M_{\infty w} - M_p}{\frac{\Delta x_w}{2D_{ef w}} + \frac{1}{h_w}} \quad (3.39)$$

Procedendo da mesma forma que na face oeste, obtém-se as expressões para o fluxo difusivo e convectivo e realizando os procedimentos análogos, obtém-se a Equação (3.40) para face norte:

$$\phi_n'' = \frac{M_p - M_{\infty n}}{\frac{\Delta y_n}{2D_{ef n}} + \frac{1}{h_n}} \quad (3.40)$$

Aplicando o mesmo raciocínio empregado para as faces anteriores, obtém-se:

$$\phi_b'' = \frac{M_{\infty b} - M_p}{\frac{\Delta z_b}{2D_{ef b}} + \frac{1}{h_b}} \quad (3.41)$$

Dessa forma, para esse volume de controle, a equação discretizada, usando a formulação totalmente implícita, pode ser escrita, a partir da Equação (3.23), do seguinte modo:

$$\begin{aligned} (M_p - M_p^0) \Delta x \Delta y \Delta z = & \phi_w'' \Delta y \Delta z \Delta t + D_{efe} \frac{M_E - M_p}{\Delta x_e} \Delta y \Delta z \Delta t - \phi_n'' \Delta x \Delta z \Delta t \\ & - D_{efs} \frac{M_p - M_s}{\Delta y_s} \Delta x \Delta z \Delta t - D_{eff} \frac{M_p - M_f}{\Delta z_f} \Delta x \Delta y \Delta t + \phi_b'' \Delta x \Delta y \Delta t \end{aligned} \quad (3.42)$$

Levando-se em consideração as expressões para o fluxo dadas pelas Equações (3.39), (3.40) e (3.41), e substituindo na Equação (3.42) resulta em:

$$\begin{aligned} (M_p - M_p^0) \Delta x \Delta y \Delta z = & \frac{M_{\infty w} - M_p}{\frac{\Delta x_w}{2D_{efw}} + \frac{1}{h_w}} \Delta y \Delta z \Delta t + D_{efe} \frac{M_E - M_p}{\Delta x_e} \Delta y \Delta z \Delta t + \frac{(-M_p + M_{\infty n})}{\frac{\Delta y_n}{2D_{efn}} + \frac{1}{h_n}} \Delta x \Delta z \Delta t \\ & - D_{efs} \frac{M_p - M_s}{\Delta y_s} \Delta x \Delta z \Delta t - D_{eff} \frac{M_p - M_f}{\Delta z_f} \Delta x \Delta y \Delta t + \frac{(M_{\infty b} - M_p)}{\frac{\Delta z_b}{2D_{efb}} + \frac{1}{h_b}} \Delta x \Delta y \Delta t \end{aligned} \quad (3.43)$$

Dessa forma, obtém-se a equação de difusão na forma discretizada para o volume de controle em estudo:

$$A_p M_p = A_e M_E + A_s M_s + A_f M_f + B \quad (3.44)$$

onde:

$$\begin{aligned} A_p = & \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{D_{efe} \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} + \frac{D_{efw} \Delta y \Delta z}{\frac{D_{efw}}{h_w} + \frac{\Delta x_w}{2}} + \frac{D_{efn} \Delta x \Delta z}{\frac{D_{efn}}{h_n} + \frac{\Delta y_n}{2}} + \frac{D_{efs} \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} \\ & + \frac{D_{eff} \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} + \frac{D_{efb} \Delta x \Delta y}{\frac{D_{efb}}{h_b} + \frac{\Delta z_b}{2}} \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$A_e = \frac{D_{efe} \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} \quad (3.46)$$

$$A_s = \frac{D_{efs} \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} \quad (3.47)$$

$$A_f = \frac{D_{eff} \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} \quad (3.48)$$

$$B = M_p^0 \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{D_{efw} \Delta y \Delta z}{\frac{D_{efw}}{h_w} + \frac{\Delta x_w}{2}} M_{\infty w} + \frac{D_{efn} \Delta x \Delta z}{\frac{D_{efn}}{h_n} + \frac{\Delta y_n}{2}} M_{\infty n} + \frac{D_{efb} \Delta x \Delta y}{\frac{D_{efb}}{h_b} + \frac{\Delta z_b}{2}} M_{\infty b} \quad (3.49)$$

### 3.5.4 Emprego da simetria para o paralelepípedo

Em virtude da forma geométrica do paralelepípedo ser regular, a condição de simetria pode ser solucionada numericamente para o problema difusivo, levando-se em consideração uma parte da malha, como, por exemplo, 1/8 do sólido, conforme ilustrado na Figura 3.5.

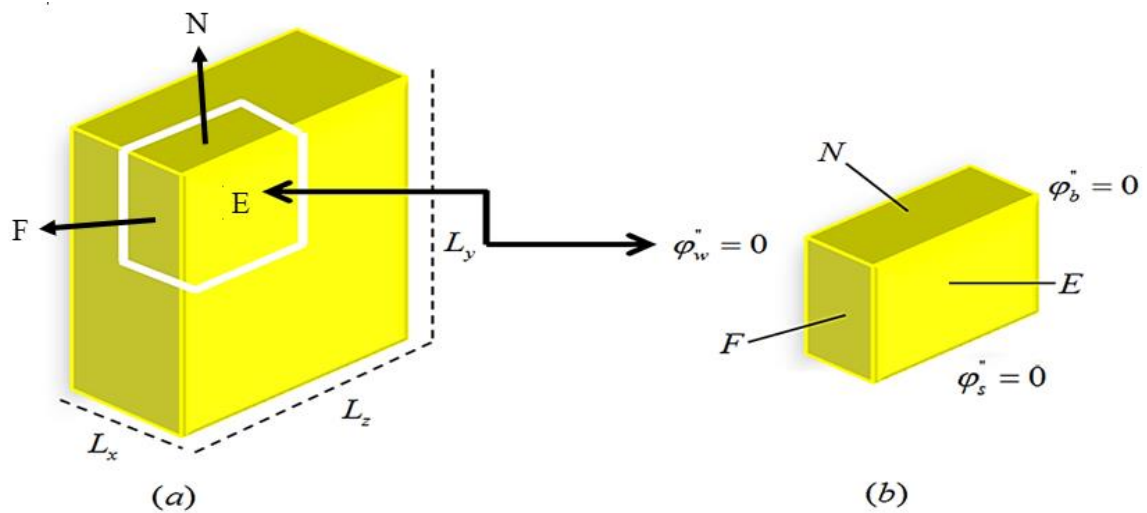


Figura 3.5 – Condição de simetria para o paralelepípedo: (a) Destaque para 1/8 do paralelepípedo; (b) Parte destacada.

Observa-se que no caso da simetria, para a parte destacada na Figura 3.5 (a) estabelece-se a condição de fluxo zero para todos os volumes de controle das fronteiras oeste, sul e atrás, de acordo com o que está ilustrado na Figura 3.5 (b). Para a discretização proposta, com condição de contorno do terceiro tipo, basta impor, para o pedaço mostrado na Figura 3.5,  $h_w = h_s = h_b = 0$ .

### 3.5.5 Discretização para o volume de controle oeste-sul-atrás, considerando os fluxos ( $h_w = h_s = h_b = 0$ ).

A Figura 3.6 apresenta os volumes de controle com as fronteiras com o meio externo, a oeste (W), a sul (S) e a atrás (B).

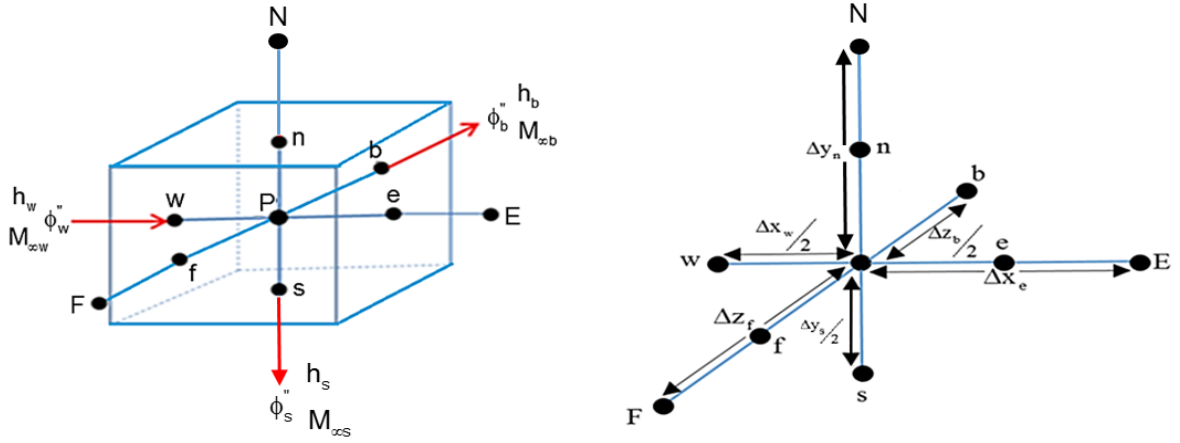


Figura 3.6 – Volume de controle oeste (W) - sul (S) - atrás (B).

Procedendo da mesma forma que no volume de controle oeste-norte-atrás, obtém-se as expressões para o fluxo difusivo e convectivo e realizando os procedimentos análogos, obtém-se a Equação (3.50) para face sul:

$$\phi_s'' = \frac{M_{\infty s} - M_P}{\frac{\Delta y_s}{2D_{effs}} + \frac{1}{h_s}} \quad (3.50)$$

Aplicando o mesmo raciocínio e utilizando a Equação (3.41) para esse volume de controle, a equação discretizada, usando a formulação totalmente implícita, pode ser escrita, a partir da Equação (3.23), do seguinte modo:

$$\begin{aligned} (M_P - M_P^0) \Delta x \Delta y \Delta z = & \phi_w'' \Delta y \Delta z \Delta t + D_{effe}^M \frac{M_E - M_P}{\Delta x_e} \Delta y \Delta z \Delta t - D_{effn}^M \frac{M_P - M_N}{\Delta y_n} \Delta x \Delta z \Delta t \\ & + \phi_s'' \Delta x \Delta z \Delta t - D_{efff}^M \frac{M_P - M_f}{\Delta z_f} \Delta x \Delta y \Delta t + \phi_b'' \Delta x \Delta y \Delta t \end{aligned} \quad (3.51)$$

Levando-se em consideração as expressões para o fluxo dadas pelas Equações (3.39), (3.41) e (3.50), e substituindo na Equação (3.51) resulta em:



$$\begin{aligned}
(M_p - M_p^0) \Delta x \Delta y \Delta z = & \frac{M_{\infty w} - M_p}{\frac{\Delta x_w}{2D_{efw}} + \frac{1}{h_w}} \Delta y \Delta z \Delta t + D_{efe} \frac{M_E - M_p}{\Delta x_e} \Delta y \Delta z \Delta t - D_{efn} \frac{M_p - M_N}{\Delta y_n} \Delta x \Delta z \Delta t \\
& + \frac{(-M_p + M_{\infty s})}{\frac{\Delta y_s}{2D_{efs}} + \frac{1}{h_s}} \Delta x \Delta z \Delta t - D_{eff} \frac{M_p - M_F}{\Delta z_f} \Delta x \Delta y \Delta t + \frac{(M_{\infty b} - M_p)}{\frac{\Delta z_b}{2D_{efb}} + \frac{1}{h_b}} \Delta x \Delta y \Delta t
\end{aligned} \quad (3.52)$$

Dessa forma, obtém-se a equação de difusão na forma discretizada para o volume de controle em estudo:

$$A_p M_p = A_e M_E + A_n M_N + A_f M_F + B \quad (3.53)$$

onde:

$$\begin{aligned}
A_p = & \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{D_{efe} \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} + \frac{D_{efw} \Delta y \Delta z}{\frac{D_{efw}}{h_w} + \frac{\Delta x_w}{2}} + \frac{D_{efn} \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} + \frac{D_{efs} \Delta x \Delta z}{\frac{D_{efs}}{h_s} + \frac{\Delta y_s}{2}} \\
& + \frac{D_{eff} \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} + \frac{D_{efb} \Delta x \Delta y}{\frac{D_{efb}}{h_b} + \frac{\Delta z_b}{2}}
\end{aligned} \quad (3.54)$$

$$A_e = \frac{D_{efe} \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} \quad (3.55)$$

$$A_n = \frac{D_{efn} \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} \quad (3.56)$$

$$A_f = \frac{D_{eff} \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} \quad (3.57)$$

$$B = M_p^0 \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{D_{efw} \Delta y \Delta z}{\frac{D_{efw}}{h_w} + \frac{\Delta x_w}{2}} M_{\infty w} + \frac{D_{efs} \Delta x \Delta z}{\frac{D_{efs}}{h_s} + \frac{\Delta y_s}{2}} M_{\infty s} + \frac{D_{efb} \Delta x \Delta y}{\frac{D_{efb}}{h_b} + \frac{\Delta z_b}{2}} M_{\infty b} \quad (3.58)$$

A Equação (3.54) pode ser escrita, considerando a condição de fluxo zero para todos os volumes de controle das fronteiras oeste, sul e atrás ( $h_w = h_s = h_b = 0$ ), conforme ilustrado na Figura 3.5(b).

Dessa forma a Equação (3.54) torna-se a Equação (3.59) e a Equação (3.58) é representada pela Equação (3.60).

$$A_p = \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{D_{efe} \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} + \frac{D_{efn} \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} + \frac{D_{eff} \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} \quad (3.59)$$

$$B = M_p^0 \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \quad (3.60)$$

### 3.5.6 Parâmetro $D_{ef}$

Nos pontos nodais, o parâmetro de processo  $D_{ef}$  pode ser determinado a partir de uma relação apropriada entre tal parâmetro e a variável dependente  $M$  (SILVA, 2007; SILVA et al. 2010), da seguinte forma:

$$D_{ef} = f(M, a, b), \quad (3.61)$$

onde “a” e “b” são parâmetros que ajustam a solução numérica aos dados experimentais, sendo determinado através da otimização.

Partindo do pressuposto que a malha é uniforme, para as interfaces do volume de controle, por exemplo, na interface “e”, a seguinte equação deve ser utilizada para determinar o parâmetro  $D_{ef}$  (PATANKAR, 1980; SILVA, 2007).

$$D_{ef\ e} = \frac{2D_{ef\ E}D_{ef\ P}}{D_{ef\ E} + D_{ef\ P}} \quad (3.62)$$

onde  $D_{ef\ E}$  e  $D_{ef\ P}$  são os valores do parâmetro  $D_{ef}$  nos pontos nodais E e P, respectivamente.

Na discretização da equação de difusão requer o conhecimento dos valores de  $D_{ef}$  não no ponto nodal, mas nas faces leste, oeste, norte, sul, frente e atrás de cada volume de controle. É importante salientar que, se  $D_{ef}$  for constante em todo domínio, este é o valor para todas as faces do volume de controle. Entretanto, se este parâmetro for variável, deve ser determinado para todas as faces de cada volume de controle. Nos pontos nodais,  $D_{ef}$  deve ser calculado por uma função adequada que relacione a variável de interesse M em cada ponto nodal. Detalhes desta dedução podem ser vistos em Silva (2007) e Farias (2011).

### 3.5.7 Valor médio do teor de umidade ( $\bar{M}$ ) para uma solução numérica

Para determinar o valor médio da variável de interesse, a partir da solução numérica e, portanto, no domínio computacional, torna-se necessário discretizar a Equação (3.63). O resultado da discretização é expresso por:

$$\bar{M} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{k=1}^{N_k} M_{ijk} \Delta V'_{ijk}, \quad (3.63)$$

com

$$V = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{k=1}^{N_k} \Delta V'_{ijk}, \quad (3.64)$$

onde V é o volume do sólido, i, j e k definem a posição do ponto nodal do volume de controle,  $\Delta V'_{ijk}$  é o valor do volume deste volume elementar,  $N_i, N_j$  e  $N_k$  definem o número de volumes de controle ao longo das arestas x, y e z, respectivamente. Por outro lado, para uma malha uniforme, tem-se:

$$\Delta V'_{ijk} = \Delta x \Delta y \Delta z, \quad (3.65)$$

### 3.6 Software desenvolvido

O estudo da cinética de secagem convectiva dos grãos de milho de variedade 1051, realizado neste trabalho, tem como base modelos matemáticos difusivos, nos quais se faz uso de soluções numéricas da equação de difusão, com condição de contorno do terceiro tipo, para geometria tridimensional. Neste sentido, desenvolveram-se códigos computacionais com base na modelagem matemática descrita na seção 3.7, utilizando *Studio Compaq Visual Fortran Professional Edition V. 6.6.0* (Fortran 95) usando a opção *Quick Win Application*. A plataforma utilizada foi *Windows XP*, edição *Ultimate*, embora o *software* possa ser executado no sistema operacional *Linux*.

#### 3.6.1 Algoritmo para simulação dos processos difusivos

As rotinas computacionais desenvolvidas para simular os processos difusivos, tiveram por base o método dos volumes finitos para a obtenção de soluções numéricas das equações de difusão tridimensional, em coordenadas cartesianas, com condição de contorno do terceiro tipo, permitindo-se variações nas dimensões dos grãos de milho nas difusividades efetivas de massa de acordo com a metodologia descrita na seção 3.1.

Dois métodos de algoritmos são utilizados para solução de sistema de equações lineares, o método iterativo de Gauss-Seidel e o método direto TDMA, mas a opção escolhida neste trabalho é o algoritmo TDMA, por ser muito mais rápido. Tal algoritmo é um método direto e é usado para resolver sistemas de equações dados na forma matricial (PRESS et al., 1996; BORTOLI, 2000; MALISKA, 2004).

Uma rápida descrição do método iterativo de Gauss-Seidel e do método TDMA pode ser obtida nos trabalhos (MALISKA, 2004; GAMA, 2014).

#### 3.6.2 Otimizador utilizado para estimar os parâmetros de processos

Com a finalidade de estimar os parâmetros de processos, foi utilizado o programa computacional *LS Optimizer* desenvolvido por (SILVA e SILVA, 2016), na qual foi acoplado o programa computacional que é subdividido em subrotinas que, quando invocadas, resolvem a equação de difusão tridimensional em coordenadas cartesianas, disponibilizando os valores

médios da grandeza de interesse em todos os estepes de tempo e, em particular, para os instantes de tempo correspondentes aos dados experimentais. O *LS Optimizer* permite acompanhar todo processo e eventualmente interromper, na medida em que cada ciclo de estimativa de parâmetros é finalizado, são mostrados na tela do computador os valores parciais dos parâmetros, assim como o valor da função  $\chi^2$  obtido. No final do processo de otimização, de acordo com a precisão fixada, geram-se arquivos com os resultados das estimativas.

### 3.7 Matéria prima e experimentos realizados

Os estudos experimentais de secagem de grãos de milho em camada fina utilizando ar quente apresentados neste trabalho foram realizados durante o mês de julho de 2015, no Laboratório de Engenharia de Alimentos (LEA) da Unidade Acadêmica de Engenharia de Alimentos do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN), Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. A Tabela A.1 apresenta as condições do ar de secagem, sob as quais foram realizados os experimentos.

#### 3.7.1 Matéria prima

Neste trabalho, foi utilizado como matéria-prima o milho de variedade 1051 (Figura 3.7), adquirido na nova feira da Prata – Raimundo Viana Macedo, em Campina Grande, Estado da Paraíba, Brasil, do proprietário do Sítio Geraldo de Baixo no município de Alagoa Nova, José Inácio da Costa Filho.



Figura 3.7 – Amostra da plantação do milho, utilizada no experimento.

As espigas de milho foram adquiridas ainda com a palha totalmente verde e colocadas para secar à temperatura ambiente por três dias sem a palha em uma bandeja de plástico no Laboratório de Engenharia de Alimentos (LEA) com o objetivo de atingir uma maturação que permitisse a separação dos grãos da espiga sem danificá-los, para posteriormente serem debulhados, conforme mostrado na Figura 3.8.



Figura 3.8 – Grãos de milho utilizado nos experimentos.

### 3.7.2 Procedimentos experimentais

Após terem atingido o grau de maturação desejado, as espigas de milho foram debulhadas e os grãos transportados para o laboratório. A limpeza para remoção do excesso de impureza e materiais estranhos foi realizada manualmente. Em seguida, os grãos foram embalados em saco plástico e armazenados à temperatura de  $(6,00 \pm 1,00) ^\circ\text{C}$  até o momento da secagem.

Os grãos selecionados foram colocados em três cestos de tela fina de alumínio, as duas primeiras medindo 10,0 cm por 7,0 cm, e a terceira medindo 12,0 cm por 6,0 cm identificadas por um número, cada uma com 35g de milho, conforme mostrado na Figura 3.9.



Figura 3.9 – Grãos de milho no cesto de tela fina de alumínio.

Para verificar o encolhimento dos grãos, foi utilizado um cesto com uma tela fina de alumínio com dimensões de 10,0 cm por 9,0 cm onde foram colocados 03 (três) grãos identificando suas dimensões conforme ilustra a Figura 3.10.



Figura 3.10 – Grãos de milho no cesto de tela fina de alumínio para encolhimento.

Foram realizadas também as medidas largura, comprimento e espessura dos três grãos identificados conforme Figura 3.11. Para medição das dimensões dos grãos, foi utilizado um paquímetro digital TDS marca Digimess, modelo 100.174L, com resolução de 0,01 mm e fundo de escala de 150 mm.



Figura 3.11 – Paquímetro digital utilizado nos experimentos.

O cesto contendo os grãos foi pesada, sendo descartado o peso do cesto para saber o peso inicial dos grãos. As pesagens foram realizadas utilizando uma balança digital da marca Marte AS5500C, com resolução de 0,001 g e capacidade máxima de 510 g, conforme mostrada na Figura 3.12.

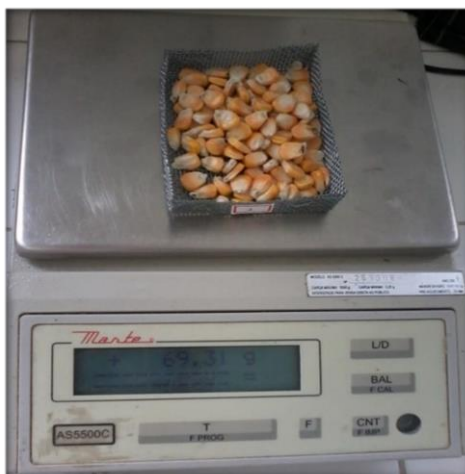


Figura 3.12 – Balança digital utilizada nos experimentos.

### 3.7.2.1 Secador utilizado nos experimentos

Após esses procedimentos, os cestos foram colocados na bandeja do secador que já tinha sido previamente ligado e regulado para as temperaturas de cada experimento, ou seja, para as temperaturas de 45, 55, 65 e 75°C. A velocidade do ar de secagem foi fixada em  $(1,00 \pm 0,05)$  m/s. Para medir a velocidade do ar de secagem, foi utilizado um anemômetro de palheta com leitura digital de marca Instrutemp, modelo MDA-II, para todos os experimentos conforme a Figura 3.13.



Figura 3.13 – Anemômetro de palheta utilizado para medir a velocidade do ar quente.



O secador de leito fixo convectivo utilizado neste estudo, foi o Secador de sementes do laboratório da SELECT, modelo S.S.4500W com fluxo vertical, controlador de temperatura e controlador de velocidade do ar, ilustrado na Figura 3.14.



Figura 3.14 – Secador utilizado nos experimentos de secagem dos grãos de milho.

A Figura 3.15 apresenta o esquema do secador de leito fixo convectivo, utilizado nos experimentos realizados neste trabalho.

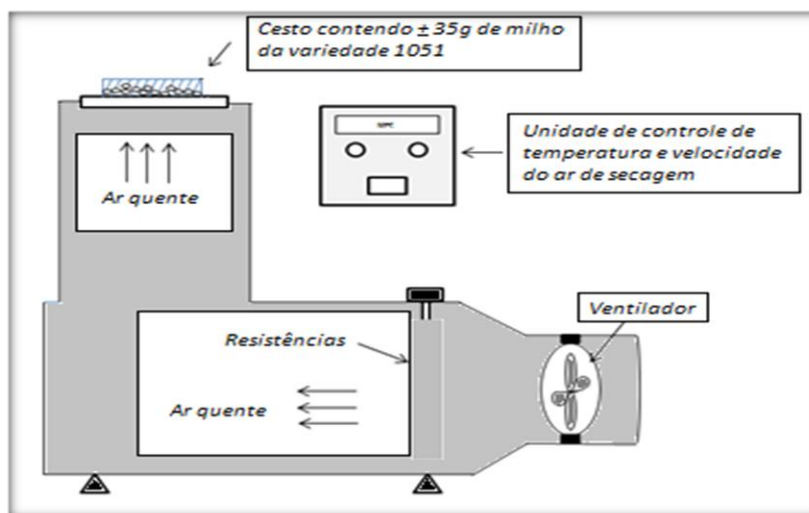


Figura 3.15 – Esquema do secador convectivo usado nos experimentos de secagem.

Cada processo de secagem foi realizado em quatro cestos simultaneamente, sendo três contendo  $(35,00 \pm 0,05)$  g do produto e uma contendo três grãos de milho identificados através de uma caneta de marcação fixa. Os cestos foram colocados ao mesmo tempo na grade do secador com área de  $(40 \times 40)$  cm<sup>2</sup>, com ar quente de ventilação forçada em quatro temperaturas:

45, 55, 65 e 75°C, respectivamente. As posições dos cestos na grade do secador são alteradas ciclicamente durante a interrupção do processo de secagem para pesagem das amostras. Para cada temperatura T, cada conjunto de três amostras foi selecionado tomando-se o cuidado para que os grãos fossem da mesma espiga para minimizar o efeito do encolhimento nos grãos marcados, preservando a integridade dos dados experimentais.

### 3.7.2.2 Teor de umidade dos grãos

Durante a realização dos experimentos, o teor de umidade foi medido pelo método gravimétrico. Em cada experimento, as amostras foram pesadas no início da secagem e depois em intervalos de 05 minutos durante os primeiros 20 minutos; em seguida, em intervalos de 10 minutos por 30 minutos; logo após, em intervalos de 20 minutos por 01 hora; em intervalos de 30 minutos por 01 hora e, finalmente, de 01 em 01 hora até o final do processo, quando foi atingido o teor de umidade de equilíbrio conforme apresentado nas Tabelas A.3.1 a A.3.4 do Apêndice A. Nesses mesmos intervalos, de tempo foram medidas as dimensões dos grãos (comprimento, largura e espessura), registrada a perda de água, a temperatura e a umidade das amostras.

O acompanhamento da perda de massa durante a secagem foi realizado com auxílio de uma balança analítica com precisão de 0,01g.

Depois da secagem, o produto foi colocado em uma estufa (Figura 3.16) à temperatura de  $(105 \pm 1,00)$  °C, por um período de 24h, com a finalidade de determinar a massa seca do produto, e consequentemente o teor de água do produto ao final de cada prática experimental.

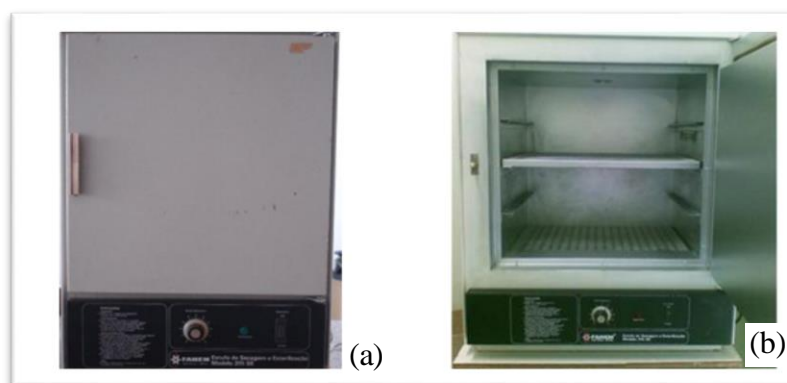


Figura 3.16 – Estufa utilizada no experimento: (a) Vista frontal; (b) Interior da estufa.

Após terem sido retiradas da estufa, as amostras foram colocadas no dessecador a baixa pressão, conforme mostrado na Figura 3.17, até atingirem a temperatura ambiente sem receber umidade do meio externo, quando, então, foram pesadas para assim se obter os valores de massa seca para cada um dos processos de secagem nas temperaturas do ar de secagem especificadas anteriormente.



Figura 3.17 – Dessecador utilizado no experimento.

### 3.7.2.3 Cálculo do teor de umidade

O cálculo do teor de umidade médio (ou quantidade de água) dos grãos e sementes pode ser obtido em base úmida ( $\overline{M}_u$ ) ou em base seca ( $\overline{M}$ ). Com os dados obtidos nos experimentos para a massa ( $m$ ) e para a massa seca ( $m_s$ ), foi possível calcular o teor de água em base seca a partir da seguinte expressão:

$$\overline{M} = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (3.66)$$

As razões de umidade e as curvas de razão de umidade em função do tempo de secagem foram obtidas a partir dos dados de perda de massa das amostras durante as secagens sucessivas e dos teores de umidade determinados ao final de cada secagem. A expressão utilizada para o cálculo da razão de umidade está expressa na Equação (3.67).

$$\overline{M}^* = \frac{\overline{M} - M_{eq}}{M_o - M_{eq}} \quad (3.67)$$

onde:

$\overline{M}^*$  = razão de umidade média do produto, na sua forma adimensional;

$\overline{M}$  = teor de umidade médio do produto em base seca;

$M_{eq}$  = teor de umidade de equilíbrio do produto em base seca;

$M_o$  = teor de umidade inicial do produto em base seca;

Neste trabalho, a fim de descrever a cinética de secagem dos grãos de milho em camada fina, a partir das equações empíricas, as seguintes considerações foram estabelecidas:

- 1) O número de parâmetros de ajuste das equações empíricas deverá ser de apenas um ou dois;
- 2) Uma expressão matemática para a taxa de secagem, como função do tempo deverá ser obtida a partir de uma equação empírica utilizando o conceito do cálculo da derivada;
- 3) Uma expressão para o tempo de secagem, em função do teor de umidade deverá ser obtida a partir da equação empírica, usando o conceito da função inversa.

A partir da suposição de número 1, o teor de umidade médio  $\overline{M}$  num tempo  $t$  será obtido por uma expressão da forma:

$$\overline{M} = M_{eq} + (M_o - M_{eq}) f(t, a, b), \quad (3.68)$$

Onde  $f(t, a, b)$  é uma função com 1 ou 2 parâmetros de ajuste ( $a$  e  $b$ ), e esta função deve satisfazer todos os pressupostos estabelecidos. Por outro lado, a Equação (3.68) pode ser modificada para expressar o teor de umidade adimensional no tempo  $t$ , também conhecida como razão de umidade, como foi mostrada através da Equação (3.67).

### 3.7.3 Modelos empíricos empregados para descrever a secagem

Modelos empíricos são importantes, não só para descrever a remoção de água na secagem em camada fina, como também para descrever a penetração de calor durante essa remoção, quando o ar quente é utilizado no procedimento experimental. Esses modelos negligenciam os fundamentos termodinâmicos dos processos de secagem, o que permite considerar o teor de água e a temperatura constante para todo o grão. Procuram relacionar o teor de água e o tempo de secagem com os dados obtidos experimentalmente. Muitos pesquisadores preferem adotar os métodos empíricos em virtude da complexidade matemática e da falta de dados confiáveis sobre condutividade térmica e a difusividade de massa.

Várias pesquisas foram realizadas na literatura a fim de encontrar equações empíricas que satisfaçam os pressupostos estabelecidos (TURHAN et al., 2002; AKPINAR E BICER, 2005; GHAZANFARI et al., 2006; GANESAPILLAI et al., 2008; ROBERTS et al., 2008; HII et al., 2009; DIAMANTE et al., 2010; KALETA E GÓRNICKI, 2010; KUMAR et al., 2010; MERCALI et al., 2010; MUNDADA et al., 2011; TUNDE-AKINTUNDE E OGUNLAKIN, 2011; SILVA et al., 2012).

As equações, e os modelos empíricos utilizados para descrever a cinética de secagem neste trabalho são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Modelos empíricos utilizados para descrever a cinética de secagem.

Modelo	Nome	Equação empírica	Referência
1	Page	$\bar{M}^* = \exp(-at^b)$	Diamante et al. (2010)
2	Silva et alii	$\bar{M}^* = \exp(-at - bt^{1/2})$	Silva et al. (2012)
3	Peleg	$\bar{M}^* = 1 - t / (a + bt)$	Mercali et al. (2010)
4	Wang e Singh	$\bar{M}^* = 1 + at + bt^2$	Kaleta e Górnicki (2010)
5	Lewis	$\bar{M}^* = \exp(-at)$	Kaleta e Górnicki (2010)
6	Henderson e Pabis	$\bar{M}^* = a \exp(-bt)$	Diamante et al. (2010)

em que: a e b: são os parâmetros de ajuste;

t: tempo (em minutos);

$\bar{M}^*$  : é a razão de umidade.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos procedimentos desenvolvidos para a otimização da simulação da cinética do transporte de massa em sólidos porosos com a forma de paralelepípedo. Tais procedimentos foram empregados para determinar os melhores valores da difusividade e do coeficiente de transferência convectiva de massa, a partir de dados experimentais da secagem dos grãos de milho variedade 1051. Também serão apresentados os resultados provenientes dos testes de validação do *software* desenvolvido através de soluções analíticas da equação de difusão tridimensional com condição de contorno do primeiro e do terceiro tipo.

### 4.1 Descrição da cinética de secagem utilizando modelos empíricos

Diversos trabalhos são encontrados na literatura com o objetivo de descrever a cinética de secagem e identificar as características de diversos produtos agrícolas durante a secagem, utilizando modelos empíricos (AKPINAR e BICER, 2005; CORRÊA et al., 2007; GANESAPILLAI et al., 2008; HII et al., 2009; DIAMANTE et al., 2010; KALETA e GÓRNICKI, 2010; KUMAR et al., 2010; MERCALI et al., 2010; MUNDADA et al., 2011; TUNDE-AKINTUNDE e OGUNLAKIN, 2011). Mas em geral o foco principal destes estudos é apenas a descrição da cinética de secagem em camada fina. Neste trabalho, uma atenção adicional é dada na determinação da taxa de secagem e ao tempo de secagem, permitindo a utilização dos resultados obtidos para estudar a penetração de calor durante o processo de secagem.

O desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos são relevantes para a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água (BERBERT et al., 1995). A utilização de modelos matemáticos nas simulações das operações de secagem tem auxiliado o projeto, o desenvolvimento, a avaliação e a otimização de secadores (PALACIN et al., 2005).

Os procedimentos realizados neste trabalho analisaram os valores do teor de umidade em base seca, medido em cada instante de tempo. Após os experimentos, foram obtidos os valores do teor de umidade em base seca de acordo com as Equações (3.66) e (3.67). Os teores

de umidade em base seca são apresentados nas Tabelas A.3.1 a A.3.4 do Apêndice A. Em seguida os conjuntos de dados foram analisados para cada modelo e apresentado na Tabela 3.3. Neste trabalho, o teor de umidade de equilíbrio foi determinado experimentalmente, mas equações para o cálculo deste parâmetro são abundantes na literatura para os mais variados produtos, incluindo milho (CORRÊA et al., 2007 e RESENDE et. al., 2008).

#### 4.2 Indicadores e parâmetros de ajuste estatístico das equações empíricas

O tratamento das equações empíricas apresentadas na Tabela 3.3, para a determinação dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos foram realizados utilizando o programa **LAB Fit Curve Fitting Software**, desenvolvido por Silva e Silva (2011), como também os gráficos apresentados para cada um dos modelos que serão apresentados a seguir.

Os resultados obtidos para os parâmetros de ajuste e para os indicadores estatísticos, através da realização de regressões não-lineares para cada um dos modelos proposto na Tabela 3.3, são apresentados nas Tabelas 4.1 a 4.6 para a razão de umidade utilizando os dados das Tabelas A.3.1 a A.3.4 do Apêndice A e as simulações das cinéticas de secagem nas Figuras 4.1 a 4.6. A análise destes dados estatísticos e a observação dos gráficos permitem a escolha do modelo empírico mais adequado para este trabalho.

Tabela 4.1 – Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos grãos de milho descrito pelo modelo empírico 1 (Page).

T (°C)	a	b	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>
45	$4,5498 \times 10^{-3}$	1,0207	0,99972	$6,7743 \times 10^{-4}$
55	$4,9495 \times 10^{-3}$	1,0234	0,99967	$8,1661 \times 10^{-4}$
65	$5,2753 \times 10^{-3}$	1,1506	0,99864	$5,0457 \times 10^{-3}$
75	$8,3601 \times 10^{-3}$	1,1950	0,99670	$1,0561 \times 10^{-2}$

Tabela 4.2 – Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos grãos de milho descrito pelo modelo empírico 2 (Silva et alii).

T (°C)	a	b	R <sup>2</sup>	$\chi^2$
45	$5,1640 \times 10^{-3}$	$-1,2224 \times 10^{-3}$	0,99963	$8,4794 \times 10^{-4}$
55	$5,6996 \times 10^{-3}$	$-1,4790 \times 10^{-3}$	0,99956	$1,0244 \times 10^{-3}$
65	$1,2407 \times 10^{-2}$	$-1,8249 \times 10^{-2}$	0,99778	$6,5317 \times 10^{-3}$
75	$2,2265 \times 10^{-2}$	$-2,8904 \times 10^{-2}$	0,99479	$1,4054 \times 10^{-2}$

Tabela 4.3 – Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos grãos de milho descrito pelo modelo empírico 3 (Peleg).

T (°C)	a	b	R <sup>2</sup>	$\chi^2$
45	$1,8076 \times 10^2$	$7,0142 \times 10^{-1}$	0,99884	$2,6005 \times 10^{-3}$
55	$1,6113 \times 10^2$	$7,1999 \times 10^{-1}$	0,99781	$5,1188 \times 10^{-3}$
65	$7,8808 \times 10^1$	$8,1112 \times 10^{-1}$	0,98280	$5,1096 \times 10^{-2}$
75	$4,0981 \times 10^1$	$8,7286 \times 10^{-1}$	0,96868	$8,5015 \times 10^{-2}$

Tabela 4.4 – Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos grãos de milho descrito pelo modelo empírico 4 (Wang e Singh).

T (°C)	a	b	R <sup>2</sup>	$\chi^2$
45	$-4,0117 \times 10^{-3}$	$4,2931 \times 10^{-5}$	0,99582	$1,4300 \times 10^{-2}$
55	$-4,3041 \times 10^{-3}$	$4,8217 \times 10^{-6}$	0,99451	$1,9653 \times 10^{-2}$
65	$-6,0997 \times 10^{-3}$	$8,2998 \times 10^{-6}$	0,95266	$1,7263 \times 10^{-1}$
75	$-7,2313 \times 10^{-3}$	$1,0613 \times 10^{-5}$	0,84533	$6,7735 \times 10^{-1}$

Tabela 4.5 – Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos grãos de milho descrito pelo modelo empírico 5 (Lewis).

T (°C)	a	R <sup>2</sup>	$\chi^2$
45	$5,0637 \times 10^{-3}$	0,99962	$9,3851 \times 10^{-4}$
55	$5,5727 \times 10^{-3}$	0,99953	$1,1411 \times 10^{-3}$
65	$1,0276 \times 10^{-2}$	0,99576	$1,3810 \times 10^{-2}$
75	$1,7908 \times 10^{-2}$	0,99203	$2,2061 \times 10^{-2}$

Tabela 4.6 – Resultados para a cinética de secagem da razão de umidade dos grãos de milho descrito pelo modelo empírico 6 (Henderson e Pabis).

T (°C)	a	b	R <sup>2</sup>	$\chi^2$
45	1,0005	$5,0684 \times 10^{-3}$	0,99962	$9,3665 \times 10^{-4}$
55	1,0005	$5,5776 \times 10^{-3}$	0,99953	$1,1394 \times 10^{-3}$
65	1,0306	$1,0741 \times 10^{-2}$	0,99616	$1,0309 \times 10^{-2}$
75	1,0335	$1,8736 \times 10^{-2}$	0,99254	$1,9022 \times 10^{-2}$



As simulações da cinética de secagem do milho 1051 usando o modelo 1 (Page) ajustado aos parâmetros da Tabela 4.1 podem ser observadas na Figura 4.1, para as temperaturas estudadas.

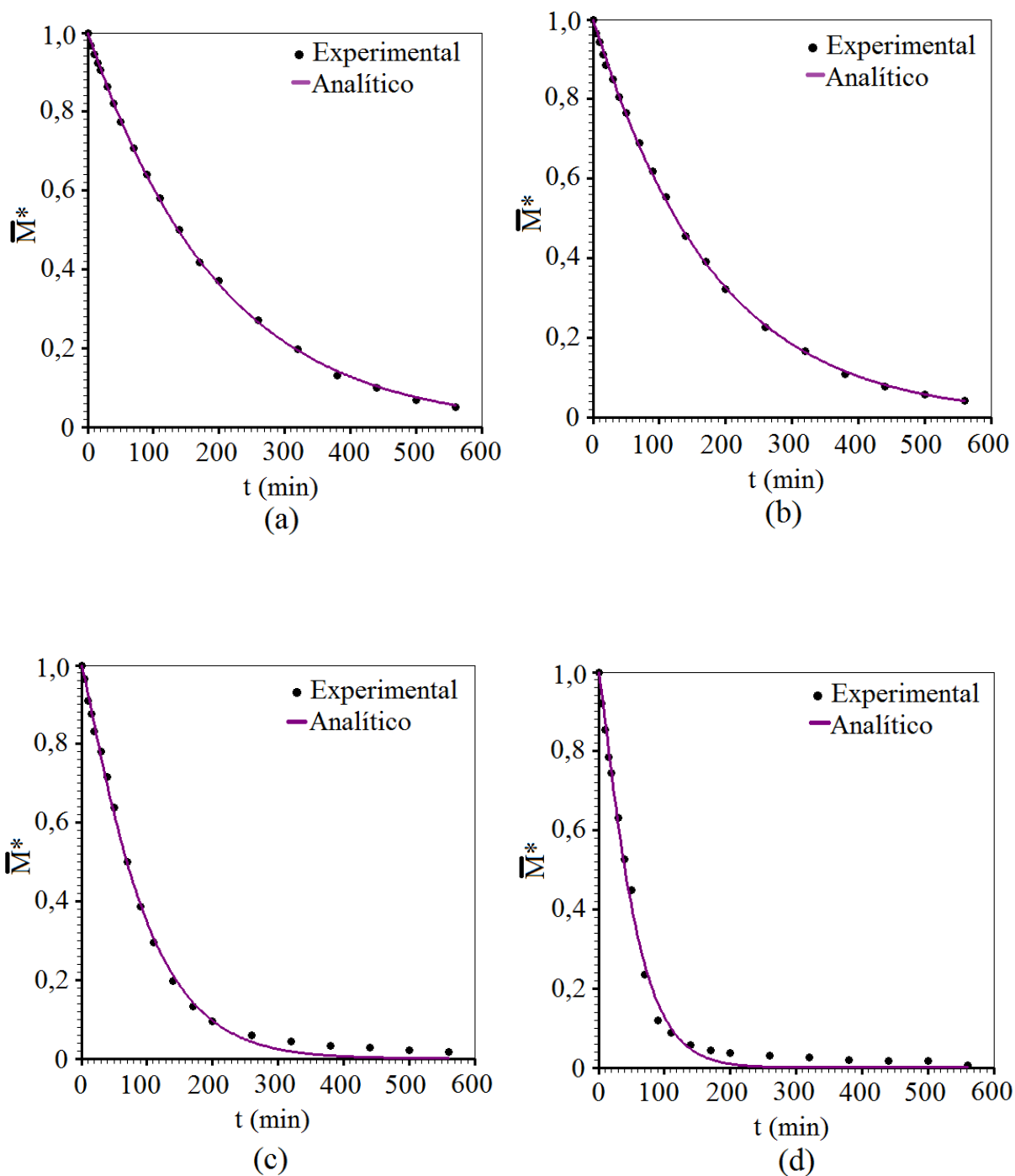


Figura 4.1 – Simulações de secagem usando o modelo 1 (Page) para as temperaturas: (a)  $T = 45^\circ\text{C}$ ; (b)  $T = 55^\circ\text{C}$ ; (c)  $T = 65^\circ\text{C}$  e (d)  $T = 75^\circ\text{C}$ .

As simulações da cinética de secagem do milho 1051 usando o modelo 2 (Silva et alii) ajustado aos parâmetros da Tabela 4.2 podem ser observadas na Figura 4.2, para as temperaturas estudadas.

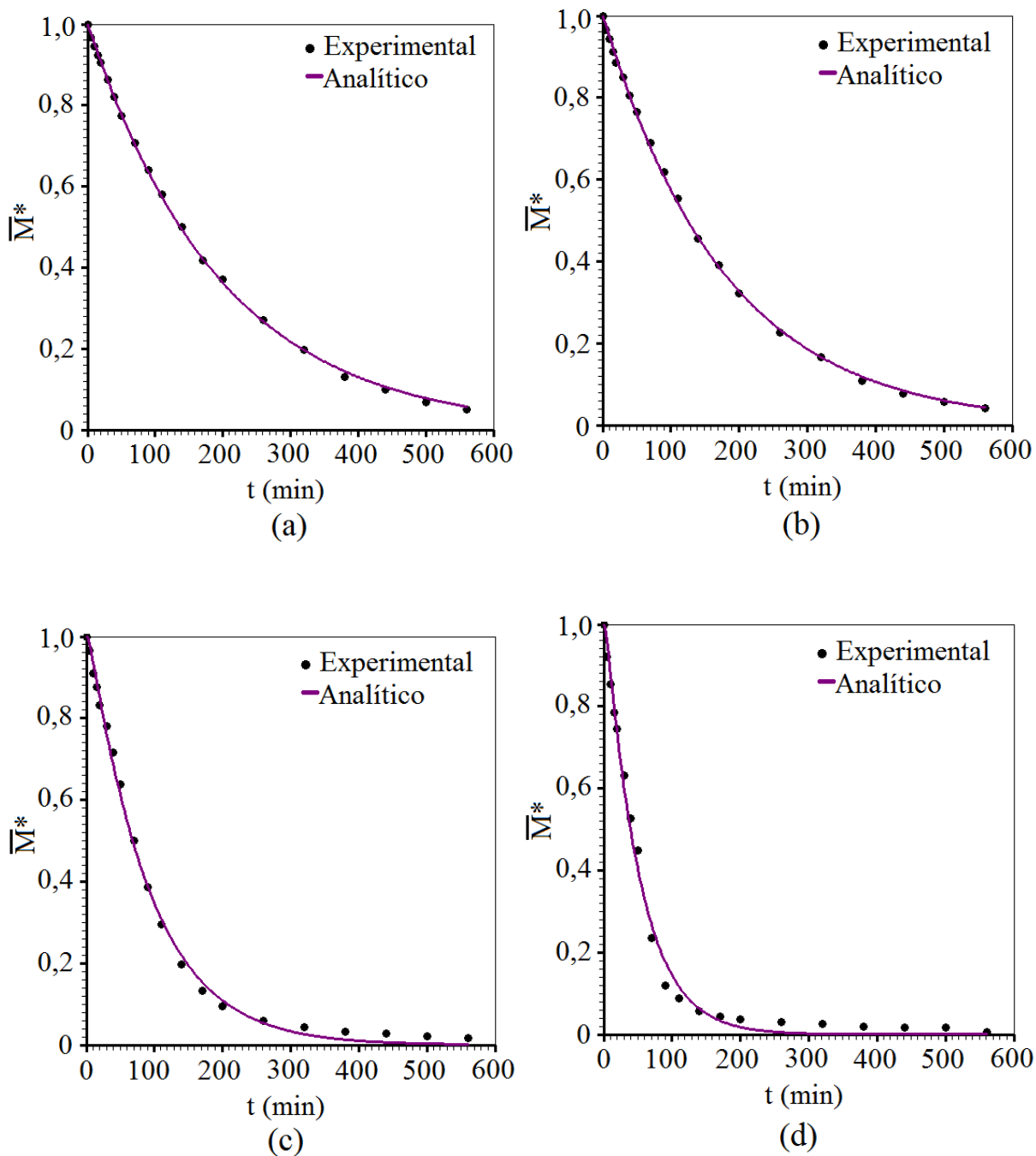


Figura 4.2 – Simulações de secagem usando o modelo 2 (Silva et alii) para as temperaturas: (a)  $T = 45^\circ\text{C}$ ; (b)  $T = 55^\circ\text{C}$ ; (c)  $T = 65^\circ\text{C}$  e (d)  $T = 75^\circ\text{C}$ .

As simulações da cinética de secagem do milho 1051 usando o modelo 3 (Peleg) ajustado aos parâmetros da Tabela 4.3 podem ser observadas na Figura 4.3, para as temperaturas estudadas.

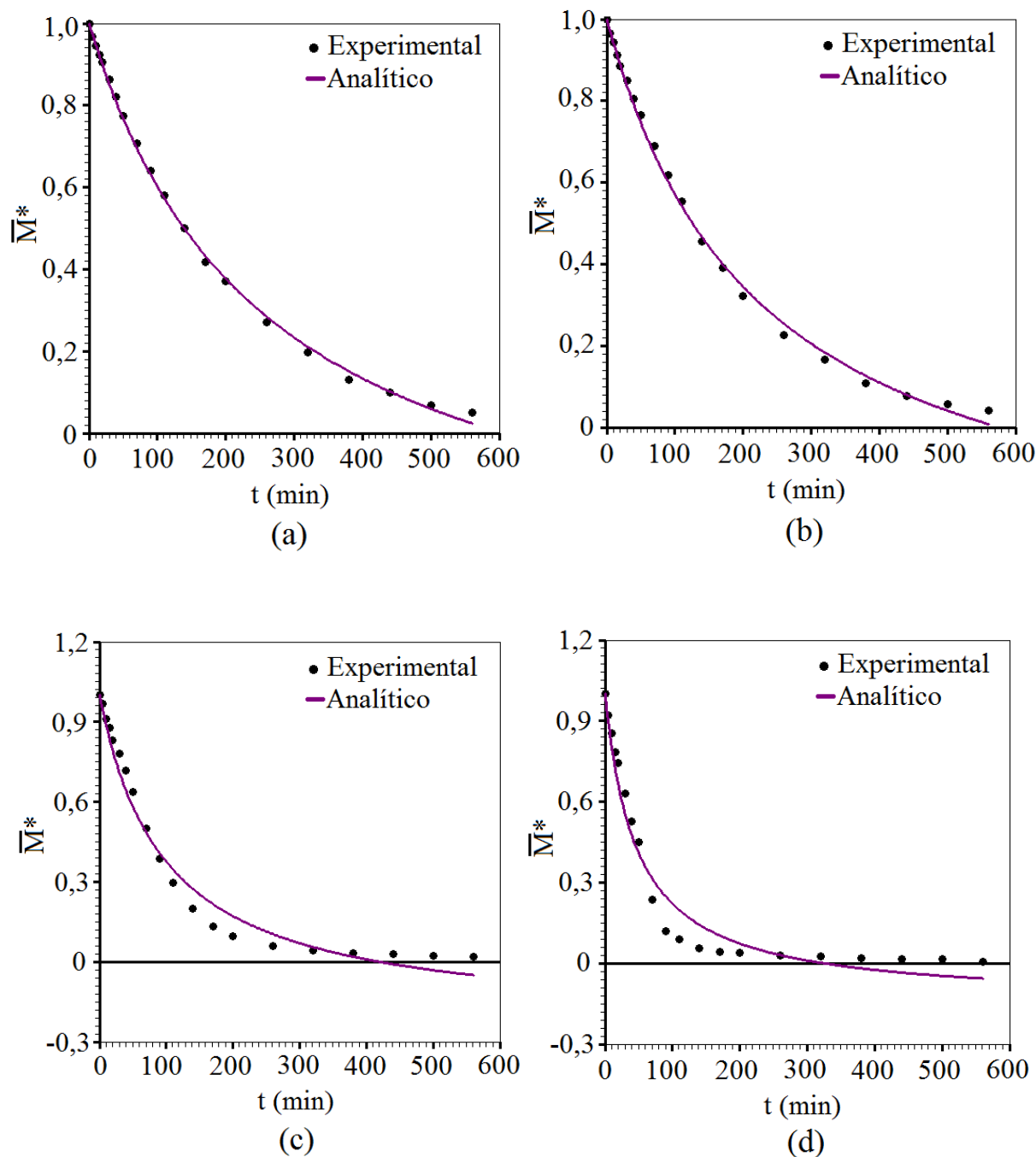


Figura 4.3 – Simulações de secagem usando o modelo 3 (Peleg) para as temperaturas: (a)  $T = 45^\circ\text{C}$ ; (b)  $T = 55^\circ\text{C}$ ; (c)  $T = 65^\circ\text{C}$  e (d)  $T = 75^\circ\text{C}$ .

As simulações da cinética de secagem do milho 1051 usando o modelo 4 (Wang e Singh) ajustado aos parâmetros da Tabela 4.4 podem ser observadas na Figura 4.4, para as temperaturas estudadas.

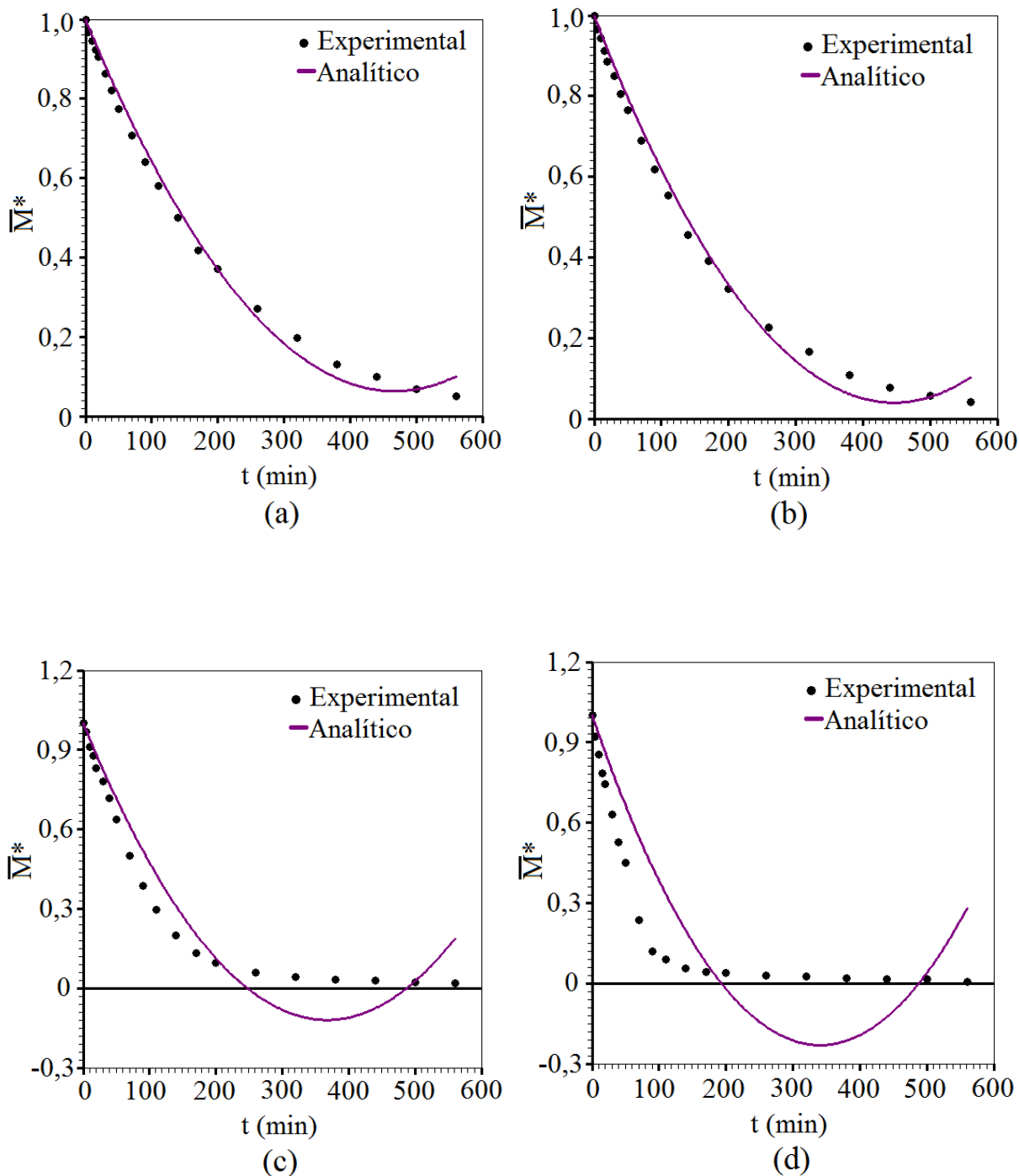


Figura 4.4 – Simulações de secagem usando o modelo 4 (Wang e Singh) para as temperaturas: (a)  $T = 45^\circ\text{C}$ ; (b)  $T = 55^\circ\text{C}$ ; (c)  $T = 65^\circ\text{C}$  e (d)  $T = 75^\circ\text{C}$ .

As simulações da cinética de secagem do milho 1051 usando o modelo 5 (Lewis) ajustado aos parâmetros da Tabela 4.5 podem ser observadas na Figura 4.5, para as temperaturas estudadas.

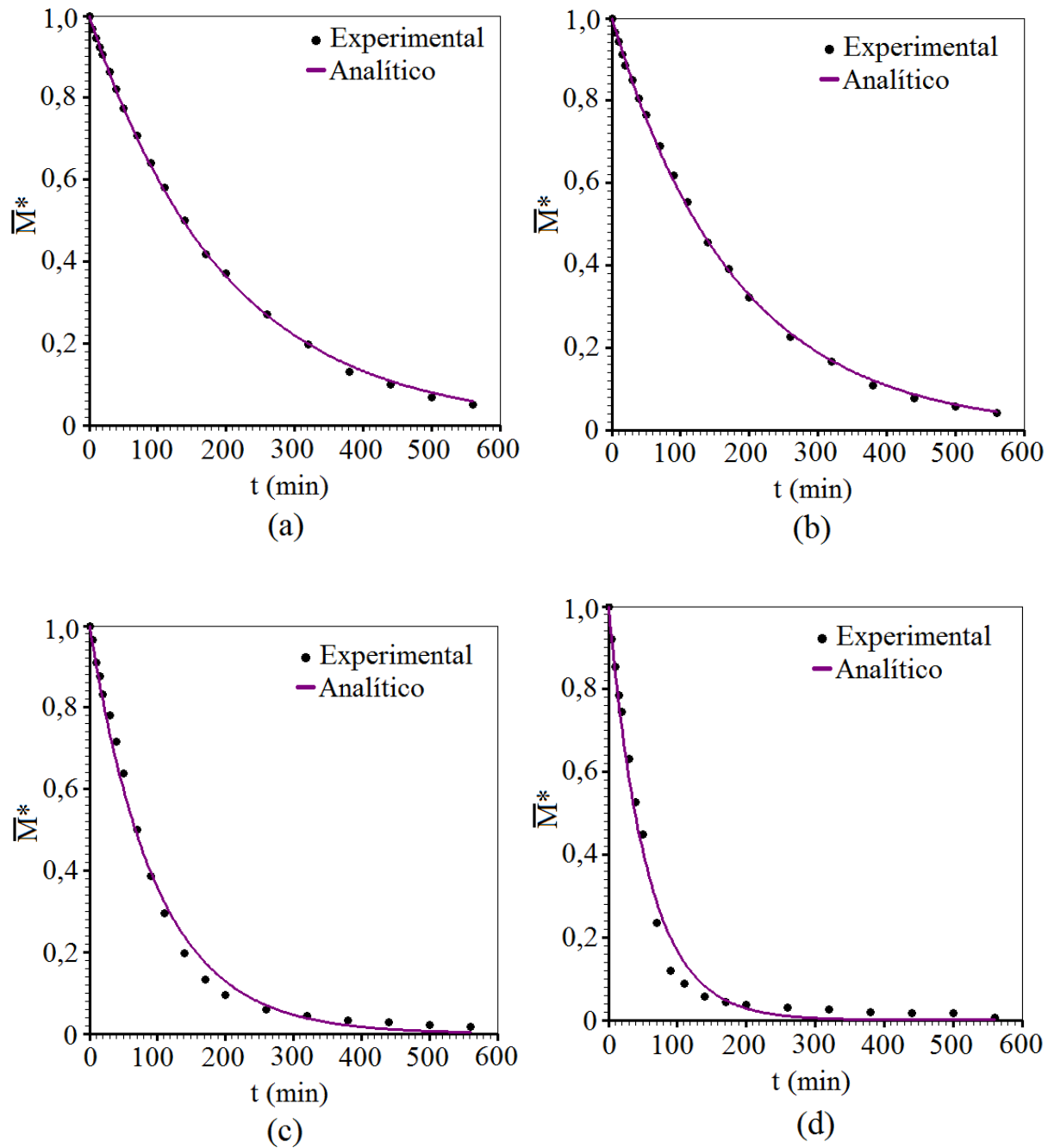


Figura 4.5 – Simulações de secagem usando o modelo 5 (Lewis) para as temperaturas: (a)  $T = 45^\circ\text{C}$ ; (b)  $T = 55^\circ\text{C}$ ; (c)  $T = 65^\circ\text{C}$  e (d)  $T = 75^\circ\text{C}$ .

As simulações da cinética de secagem do milho 1051 usando o modelo 6 (Henderson e Pabis) ajustado aos parâmetros da Tabela 4.6 podem ser observadas na Figura 4.6, para as temperaturas estudadas.

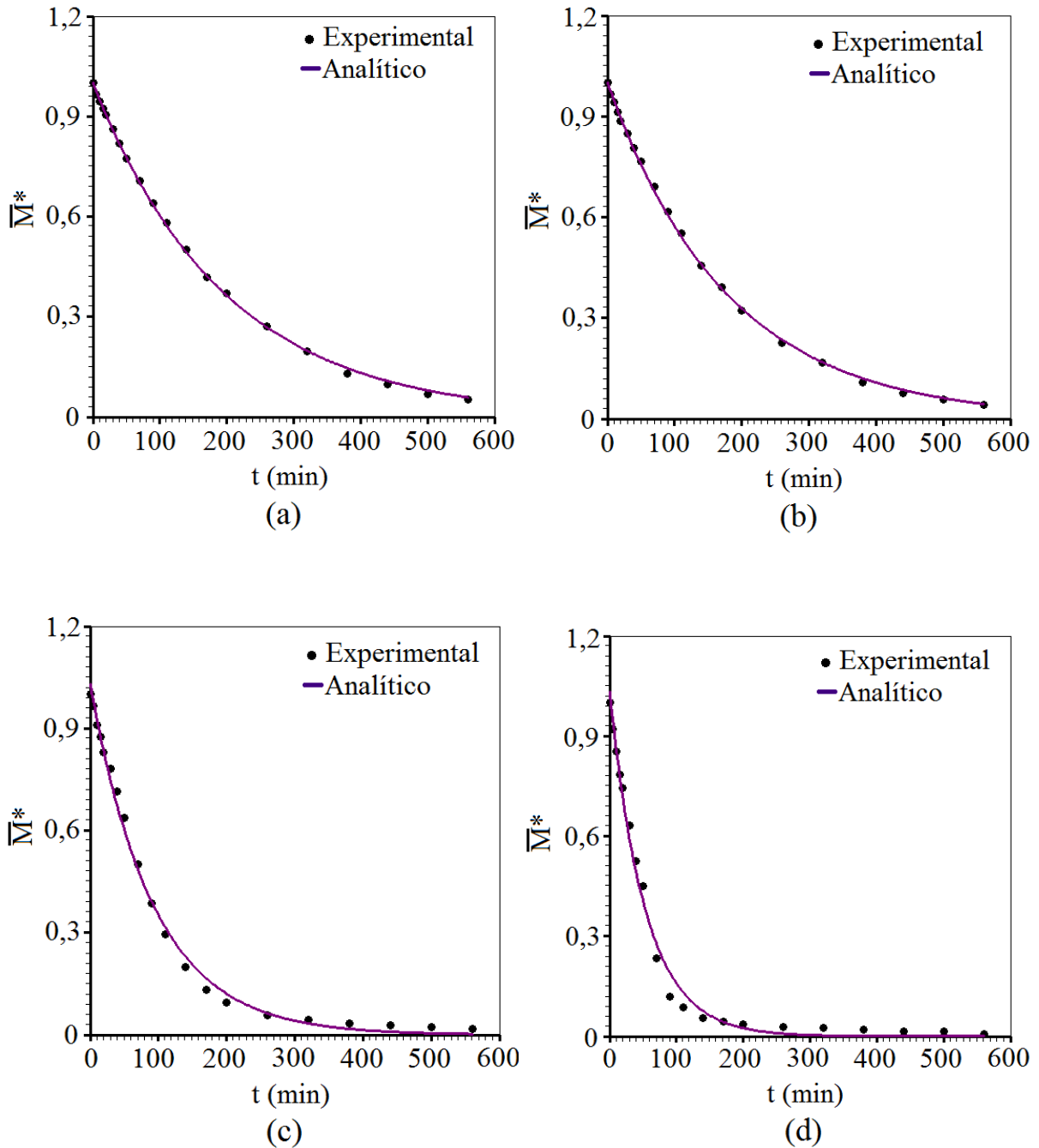


Figura 4.6 – Simulações de secagem usando o modelo 6 (Henderson e Pabis) para as temperaturas: (a)  $T = 45^\circ\text{C}$ ; (b)  $T = 55^\circ\text{C}$ ; (c)  $T = 65^\circ\text{C}$  e (d)  $T = 75^\circ\text{C}$ .

#### 4.2.1 Análise dos resultados dos modelos empíricos

Analisando os indicadores estatísticos das Tabelas 4.1 a 4.6, verifica-se entre os seis modelos estudados, o modelo de Peleg e o modelo de Wang e Singh apresentaram resultados não aceitáveis e devem ser descartados na descrição da secagem de milho. O modelo de Lewis apresentou resultados satisfatórios, enquanto o modelo de Henderson e Pabis apresentou resultados melhores que estes. Entretanto, os melhores resultados foram obtidos através do modelo 1, Page (com coeficientes de determinação e qui-quadrado próximos de 0,99972 e  $6,77 \times 10^{-4}$ , respectivamente) e o modelo 2, Silva et alii (com coeficiente de determinação e qui-quadrado com valores 0,99963 e  $8,48 \times 10^{-4}$ , respectivamente), com valores ótimos para todas as temperaturas do ar de secagem que foram estudadas.

Os resultados da cinética de secagem para cada um dos modelos estudados podem ser visualizados através das Figuras 4.1 a 4.6. O modelo 1 (Page) apresenta-se como o que melhor descreve a cinética de secagem dos grãos de milho para todas as temperaturas analisadas, apresentando resultados um pouco melhores que o modelo 2, Silva et alii. Estes modelos foram estudados e avaliados, apresentando resultados esperados (CORRÊA et al., 2007; DIAMANTE et al, 2010; KALETA e GORNICKI, 2010; SILVA et al, 2012), ou seja, para uma dada velocidade do ar de secagem, quanto maior a temperatura mais rápido é o processo de secagem.

Outros pesquisadores também usaram o ajuste do modelo 1 (Page) para descrever a secagem de produtos agrícolas em camada fina (DOYMAZ, 2010; ZABALAGA E CARBALLO, 2015). Baini e Langrish (2007) observaram a partir de resultados obtidos através dos modelos empíricos que se pode extrair parâmetros termo físicos importantes para descrever a cinética de secagem.

Com a finalidade de se fazer uma comparação mais direta entre os modelos que apresentaram os melhores resultados, a Figura 4.7 apresenta simulações da cinética de secagem, utilizando os modelos empíricos 1, (Page) e 2, (Silva et alii), num mesmo gráficos, para cada uma das temperaturas estudadas e, a partir destes gráficos, é possível observar que as curvas se ajustam perfeitamente para as temperaturas de 45 e 55°C, havendo uma pequena diferença nas temperaturas de 65 e 75°C, verificando dessa forma uma ótima conformidade entre os dois modelos observados.

Pode-se observar que os coeficientes de correlação obtidos para os dois modelos que apresentaram os melhores resultados, Page e Silva et alii, para as quatro temperaturas estudadas, foram maiores do que  $R = 0,994$ .

As simulações da cinética de secagem do milho 1051 usando os modelos 1 (Page) e 2 (Silva et alii) podem ser observadas na Figura 4.7, num mesmo gráfico, para cada uma das temperaturas estudadas.

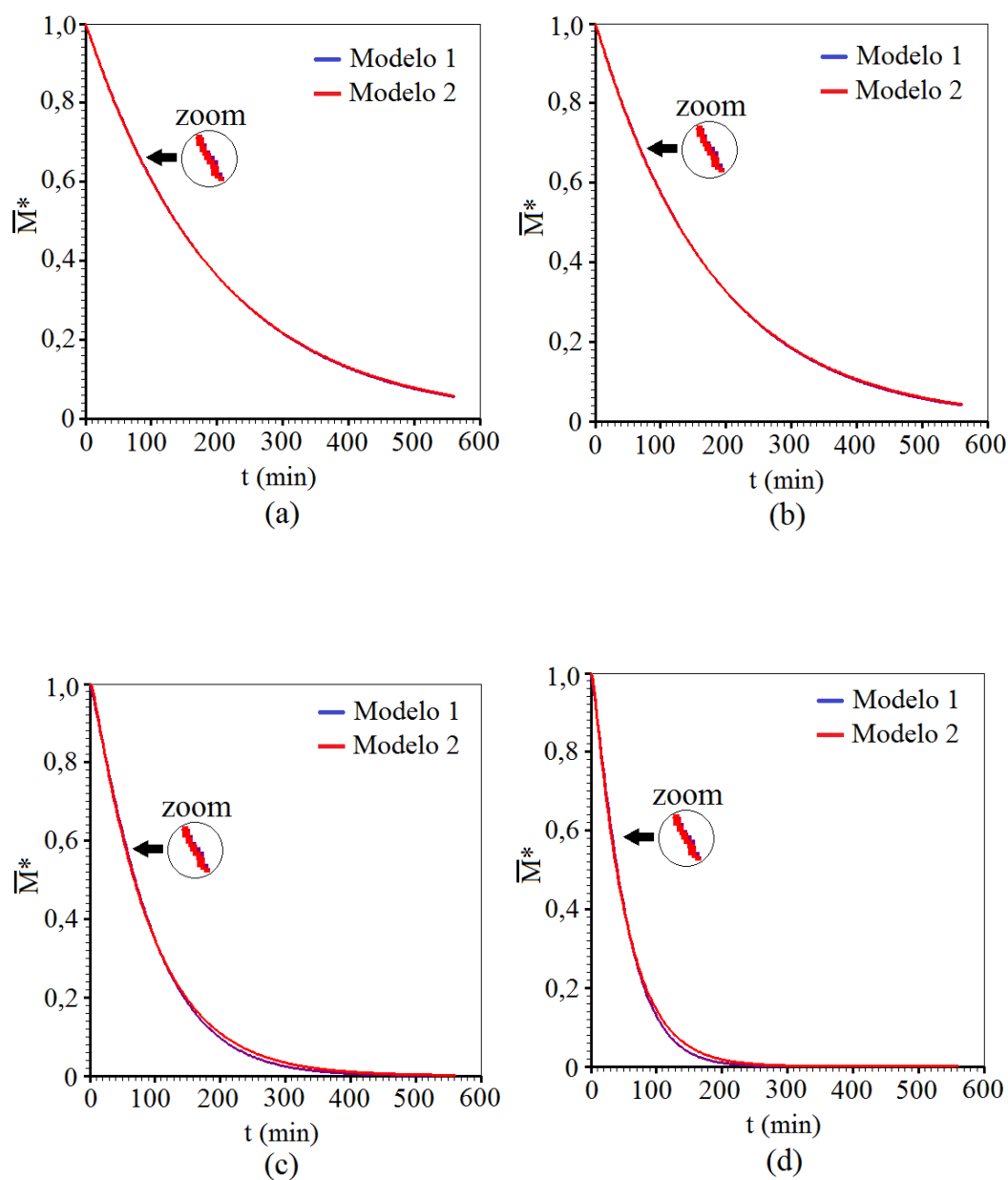


Figura 4.7 – Simulações de secagem usando os modelos 1 (Page) e 2 (Silva et alii) para as temperaturas: (a)  $T = 45^{\circ}\text{C}$ ; (b)  $T = 55^{\circ}\text{C}$ ; (c)  $T = 65^{\circ}\text{C}$  e (d)  $T = 75^{\circ}\text{C}$ .



Na análise dos resultados, para os dois modelos comparados (Figura 4.7), foram utilizados como indicadores estatísticos o coeficiente ( $R^2$ ) e o qui-quadrado ( $\chi^2$ ). Os parâmetros desses modelos, podem ser observados nas Tabelas 4.1 e 4.2. É bem verdade, que quanto menor for ( $\chi^2$ ) e mais próximo de 1 for ( $R^2$ ), melhor será o ajuste das equações proposta pelos modelos empíricos analisados.

A inspeção visual dessa Figura 4.7, bem como os indicadores estatísticos verificados através das Tabelas 4.1 e 4.2 permitem afirmar que os melhores resultados foram apresentados pelos modelos de (Page) e (Silva et alii).

Na Figura 4.8 observa-se num mesmo gráfico, para todas as temperaturas estudadas, as curvas de secagem dos grãos de milho estimados pelo Modelo 1 (Page). A simulação da cinética de secagem do milho usando este modelo apresentou os melhores indicadores estatístico. Verificou-se que, com o aumento da temperatura do ar de secagem, ocorre maior taxa de remoção de água do produto, evidenciando o aumento da taxa de secagem, fato este observado por outros pesquisadores para inúmeros produtos agrícolas (GONELI et al., 2007; RESENDE et al., 2008; PESSOA et al., 2011). Contudo, o encolhimento dos grãos foi observado no decorrer do processo com o aumento da temperatura.

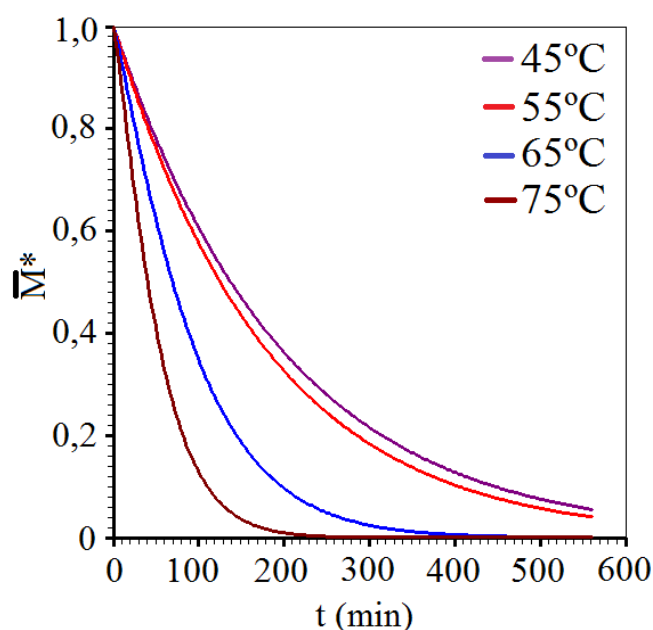


Figura 4.8 – Simulação da cinética de secagem usando o modelo 1 (Page) para as todas as temperaturas estudadas.

Embora várias teorias tenham sido propostas para prever o comportamento da secagem de grãos e sementes, na maioria das vezes, as relações semi-empíricas e empíricas têm sido as melhores opções para prever o processo de secagem, apesar de sua validade estar restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos (BROOKER et al., 1992).

A comunidade científica tem dado uma especial atenção ao modelo de secagem baseado na teoria da difusão líquida, o qual assume que não há influência da capilaridade, desprezam-se os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro, dada a dificuldade de quantificarem-se esses múltiplos efeitos na massa de produto e, também, por considerarem que os corpos entram em equilíbrio térmico com o ar instantaneamente, o que pode induzir a discrepâncias entre os resultados encontrados (GONELI et al., 2007).

### 4.3 Validação do software desenvolvido

A validação do *software* desenvolvido, foi realizado a partir das análises de consistência e de coerência dos resultados. Numa segunda etapa, foram realizadas simulações para as quais uma solução, analítica ou numérica, seja conhecida. Em seguida foi feita a comparação de resultados.

O estudo da cinética de secagem dos grãos de milho realizados neste trabalho, tem como base os modelos matemáticos difusivos, nos quais se faz necessário a utilização de soluções numéricas da equação de difusão, com condição de contorno do terceiro tipo (convectiva), para geometria tridimensional.

Para este procedimento, adota-se o modelo apresentado na literatura que recomenda validação por meio de soluções analíticas ou numéricas conhecidas. Embora se tenha um único programa, há opção de escolha para verificar a condição de contorno adequada de acordo com o problema físico a ser investigado.

Embora o programa desenvolvido permita a hipótese de parâmetros variáveis e análise do encolhimento, pode-se utilizá-lo segundo as condições de parâmetros constantes e ausência de encolhimento. Neste caso particular, as soluções numéricas devem coincidir com as soluções analíticas, constituindo um meio importante de validação para as soluções numéricas.

### 4.3.1 Validação do software através de soluções analíticas

Para verificação da solução analítica da equação de difusão tridimensional, com condição de contorno convectiva (terceiro tipo), utilizou-se o software “Convective Adsorption – Desorption”, desenvolvido por Silva e Silva (2009b), que permite a simulação de fenômenos difusivos por meio de soluções analíticas da equação de difusão, com condição de contorno do terceiro tipo, para várias geometrias, incluindo o paralelepípedo, assim como a estimativa dos parâmetros do processo por meio de otimização. No que se refere aos dados experimentais, usou-se os dados que constam em Silva et al. (2013b) referente à secagem de placas de argila vermelha. A Tabela 4.7 fornece a temperatura de secagem e os dados das placas utilizados na simulação.

Tabela 4.7 – Dados com o teor de umidade em base seca de placas de cerâmica vermelha utilizados para a simulação.

Temperatura (°C)	$\bar{M}_o$ (bs)	$\bar{M}_{eq}$ (bs)	$L_x \times 10^3$ (m)	$L_y \times 10^3$ (m)	$L_z \times 10^3$ (m)
60	0.228	0.012	6.02	24.38	73.75

Fonte: Silva et al. (2013b)

Com base nos dados apresentados na Tabela 4.7, simulou-se a cinética das placas de argila utilizando-se a geometria tridimensional na forma de um paralelepípedo. Os valores da difusividade efetiva de massa ( $D$ ) e do coeficiente de transferência convectivo de massa ( $h$ ), estimados por meio de otimização pelo programa “Convective Adsorption – Desorption” (SILVA e SILVA, 2009b) foram  $D = 8.9962 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$  e  $h = 5.2304 \times 10^{-5} \text{ m min}^{-1}$ . A simulação foi realizada de forma independente com o software “Convective Adsorption – Desorption” (SILVA e SILVA, 2009b) e no programa tridimensional desenvolvido, para um período de secagem de 473 minutos.

Referente ao código desenvolvido, usou-se uma malha com 63 volumes de controle, com 2000 estepes de tempo. A Figura 4.9 exibe as cinéticas de secagem obtidas com cada programa. A simulação das curvas, foram realizadas utilizando-se do software *LAB Fit Curve Fitting Software* (SILVA e SILVA, 2011).

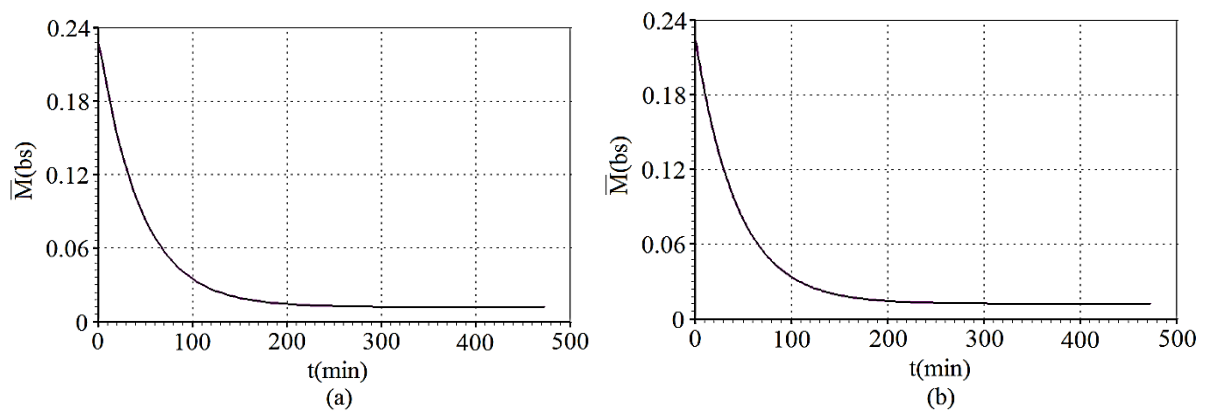


Figura 4.9 – Simulação das cinéticas de secagem de placas de argila usando: (a) “*Convective Adsorption – Desorption*” e (b) Programa desenvolvido (tridimensional).

Na Figura 4.10 observa-se a sobreposição dos dois gráficos, demonstrando boa concordância entre as curvas do Convective e do programa desenvolvido.

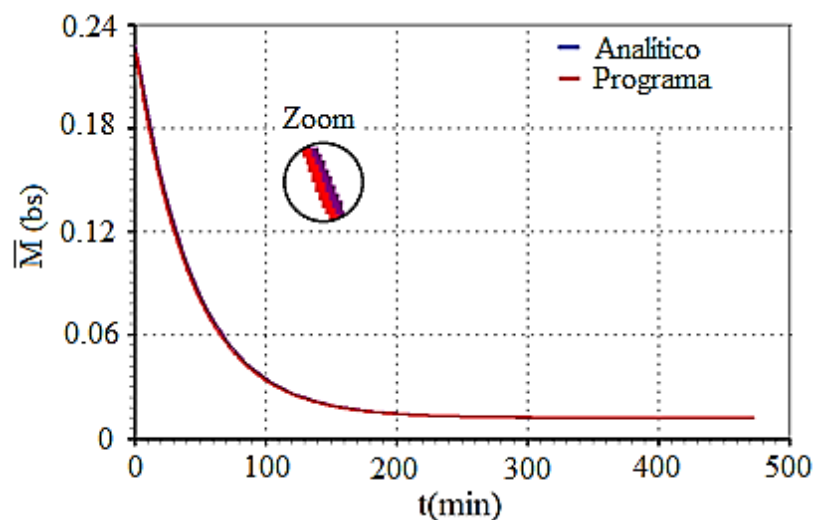


Figura 4.10 – Sobreposição de curvas entre os gráficos da solução analítica e da solução obtida pelo programa desenvolvido.

#### 4.3.2 Validação através de teste de consistência

Na análise do teste de consistência do programa computacional, considerou-se um problema fictício de secagem, a situação física inicial utilizada para avaliar a consistência do código desenvolvido foi a geometria de um paralelepípedo, considerando a condição de contorno do terceiro tipo, em função do teor de água local, e dimensões variando em função do teor de água médio no paralelepípedo.

A Figura 4.11, ilustra com detalhes os 27 tipos distintos de volumes de controle em estudo.

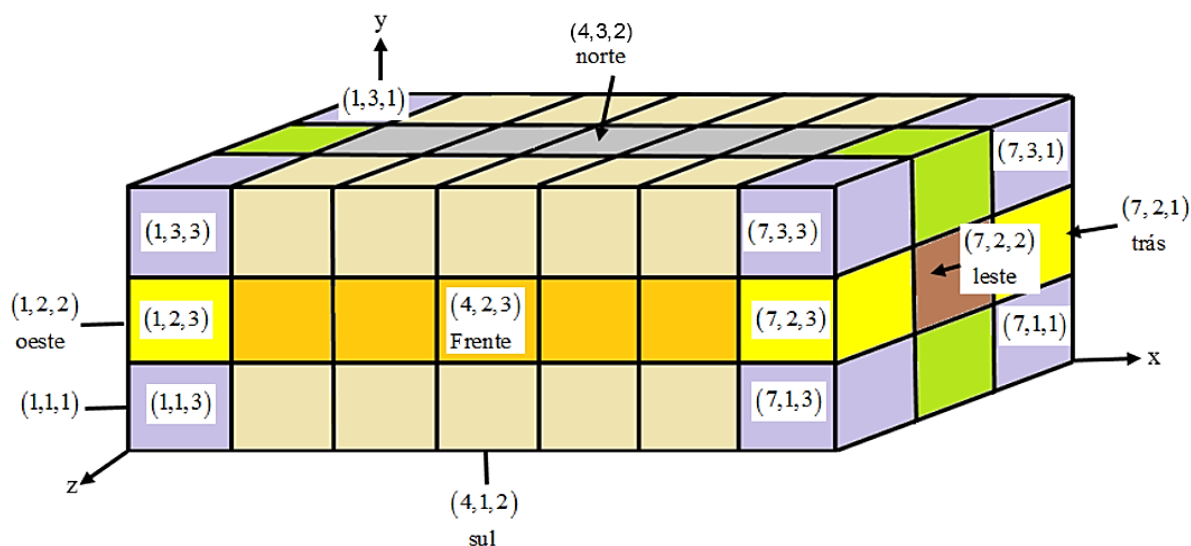


Figura 4.11 – Geometria (sem escala) em forma de paralelepípedo envolvendo uma malha 7 x 3 x 3 utilizada para testar a consistência do código computacional desenvolvido.

O tempo total do processo difusivo foi estipulado em 100 s, e o número de passos de tempo foi de 500. Os parâmetros físicos usados para as simulações foram  $D = 9.8355 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  e  $h = 5.2345 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ . O coeficiente de transferência convectiva de massa foi considerado constante, com mesmo valor nas fronteiras dos volumes de controle considerados. As dimensões e as condições inicial e final estão resumidos na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Dados de placas de cerâmica vermelha utilizados para a simulação.

$\overline{M}_o$ (bs)	$\overline{M}_{eq}$ (bs)	$L_x \times 10^3$ (m)	$L_y \times 10^3$ (m)	$L_z \times 10^3$ (m)
1.00	0.00	6.02	24.38	73.75

Com o objetivo de verificar-se a condição de simetria da situação física em questão, foi considerada a mesma condição de contorno para todas as faces do paralelepípedo, sendo analisados os transientes de volumes de controle simetricamente posicionados, de tal modo que o resultado esperado para  $\Phi$  fosse o mesmo. Para se obter os transientes referentes aos volumes de controle localizados nos vértices inferiores da geometria em forma de paralelepípedo foi feita, inicialmente, a identificação dos quatro Volumes de Controle (VC), evidenciando-se as faces que se encontram em contato com o meio, conforme os dados da Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Identificação dos volumes de controle localizados nos vértices inferiores da geometria em forma de paralelepípedo.

Faces	Volumes de controle
oeste, sul, frente	VC – (1, 1, 3)
leste, sul, frente	VC – (7, 1, 3)
leste, sul, atrás	VC – (7, 1, 1)
oeste, sul, atrás	VC – (1, 1, 1)

O software computacional *LAB Fit Curve Fitting Software V 7.2.48*, desenvolvido por Silva e Silva (2011), foi utilizado para traçar os gráficos das soluções numéricas obtidas para  $\Phi$  em função do tempo que foram gerados para cada um dos volumes de controle conforme a Tabela 4.9. Os resultados obtidos através das simulações realizadas são apresentados na Figura 4.12.

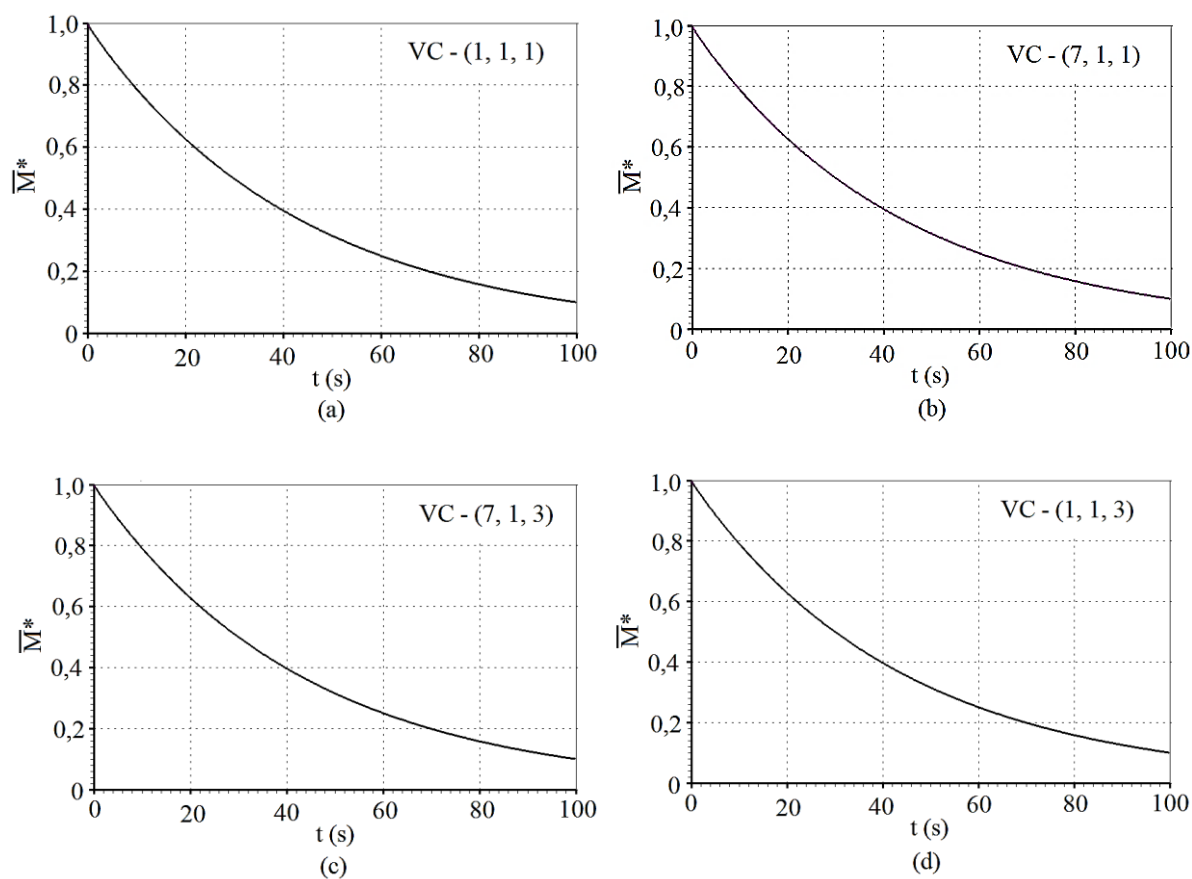


Figura 4.12 – Perfis de teor de água nos volumes de controle listados na Tabela 4.9: (a) oeste, sul, atrás; (b) leste, sul, atrás; (c) leste, sul, frente e (d) oeste, sul, frente.

Realizando a superposição das cinéticas apresentadas nos gráficos da Figura 4.12, da qual se verifica perfeita concordância, obtém-se o gráfico dado na Figura 4.13.

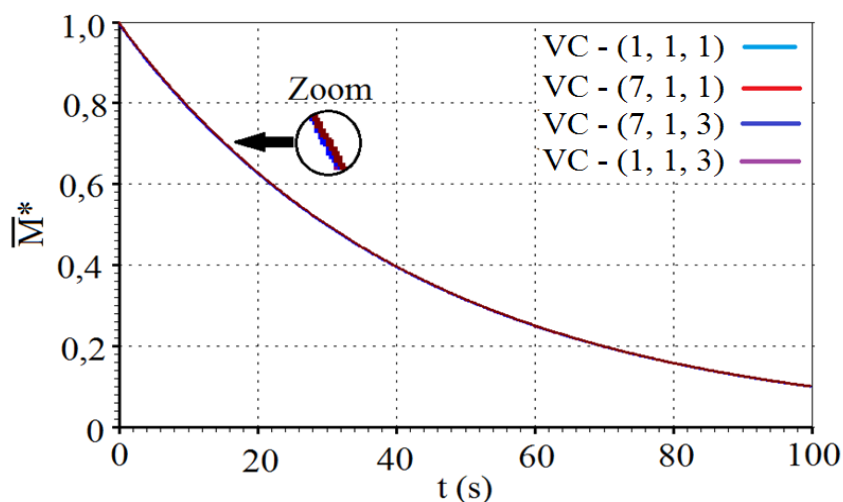


Figura 4.13 – Superposição dos transientes do teor de água para volumes de controle localizados nos vértices inferiores do paralelepípedo.

#### 4.4 Modelos analíticos de difusão para descrever a cinética de secagem

Normalmente, os modelos analíticos de difusão apresentam melhores indicadores estatísticos para descrever a cinética de secagem quando comparado aos modelos empíricos conhecidos, pois possibilitam prever a distribuição de água no interior do produto analisado, em qualquer instante de tempo, previamente determinado. Segundo Baini e Langrish (2007), em sua pesquisa de secagem, foi verificado que o modelo de difusão descreve a cinética de secagem melhor do que os modelos empíricos conhecidos, para todos os processos avaliados em seu trabalho.

Com a finalidade de estabelecer a correta condição de contorno na descrição da cinética de secagem em camada fina dos grãos de milho da variedade 1051, foi utilizado dois softwares para otimização dos resultados analisados a partir dos dados experimentais obtidos. O primeiro software utilizado foi o “*Prescribed Adsorption – Desorption*” V.2.2 (SILVA e SILVA, 2009a) usado para simular a cinética de secagem de produtos, usando a solução analítica da equação de difusão empregando a condição de contorno do primeiro tipo. O segundo software utilizado foi o “*Convective Adsorption – Desorption*” V. 2.4 (SILVA e SILVA, 2009b), este simula a cinética de secagem de produtos usando a solução analítica da equação de difusão empregando a condição de contorno do terceiro tipo.

#### 4.4.1 Cinética de secagem para a condição de contorno prescrita (primeiro tipo)

Os resultados obtidos para cinética de secagem da razão de umidade e do teor de umidade em base seca dos grãos de milho utilizando a solução analítica da equação de difusão para a condição de contorno prescrita (primeiro tipo) foram resumidos nas Tabelas 4.10 e 4.11 na qual apresenta os indicadores estatísticos referentes a este modelo.

Tabela 4.10 – Resultados da cinética de secagem da razão de umidade para o intervalo de 560 minutos.

T (°C)	$D_{ef}$ (m <sup>2</sup> min <sup>-1</sup> )	$R^2$	$\chi^2$
45	$2,3219 \times 10^{-9}$	0,97616	$1,7389 \times 10^{-1}$
55	$2,8060 \times 10^{-9}$	0,97768	$1,6599 \times 10^{-1}$
65	$5,3348 \times 10^{-9}$	0,96389	$2,0232 \times 10^{-1}$
75	$8,1265 \times 10^{-9}$	0,95455	$1,7423 \times 10^{-1}$

Tabela 4.11 – Resultados da cinética de secagem do teor de umidade em base seca para o intervalo de 560 minutos.

T (°C)	$M_{bs}$	$M_{eq}$	$D_{ef}$ (m <sup>2</sup> min <sup>-1</sup> )	$R^2$	$\chi^2$
45	0,939	0,117	$2,6484 \times 10^{-9}$	0,97349	$1,4277 \times 10^{-1}$
55	1,178	0,115	$3,1383 \times 10^{-9}$	0,97579	$2,2218 \times 10^{-1}$
65	0,984	0,061	$5,6053 \times 10^{-9}$	0,96448	$1,8547 \times 10^{-1}$
75	1,072	0,015	$8,2914 \times 10^{-9}$	0,95529	$1,9941 \times 10^{-1}$

Realizando uma comparação entre os resultados das Tabelas 4.10 e 4.11, pode-se constatar que os valores da difusividade efetiva de massa e dos indicadores estatísticos podem ser considerados equivalentes para todas as temperaturas estudadas. Nota-se, ainda, que os valores do  $R^2$  e do  $\chi^2$  apresentados nas duas tabelas, obtidos através do otimizador analítico, utilizando a condição de contorno do primeiro tipo, não são satisfatórios.

Além disso, os indicadores estatísticos obtidos na otimização usando a condição de contorno do primeiro tipo foi pior dentre todos os modelos empíricos analisados na presente pesquisa. Pode-se verificar que os ajustes não possuem bons indicadores estatísticos, além de existir uma dispersão entre os dados experimentais e os simulados, desde os instantes iniciais até os finais.



As simulações da cinética de secagem usando a condição de contorno prescrita (primeiro tipo) utilizando os dados da razão de umidade ( $\bar{M}^*$ ) dos grãos de milho empregando o valor obtido para as difusividades efetivas podem ser observadas na Figura 4.14, para cada uma das temperaturas estudadas.

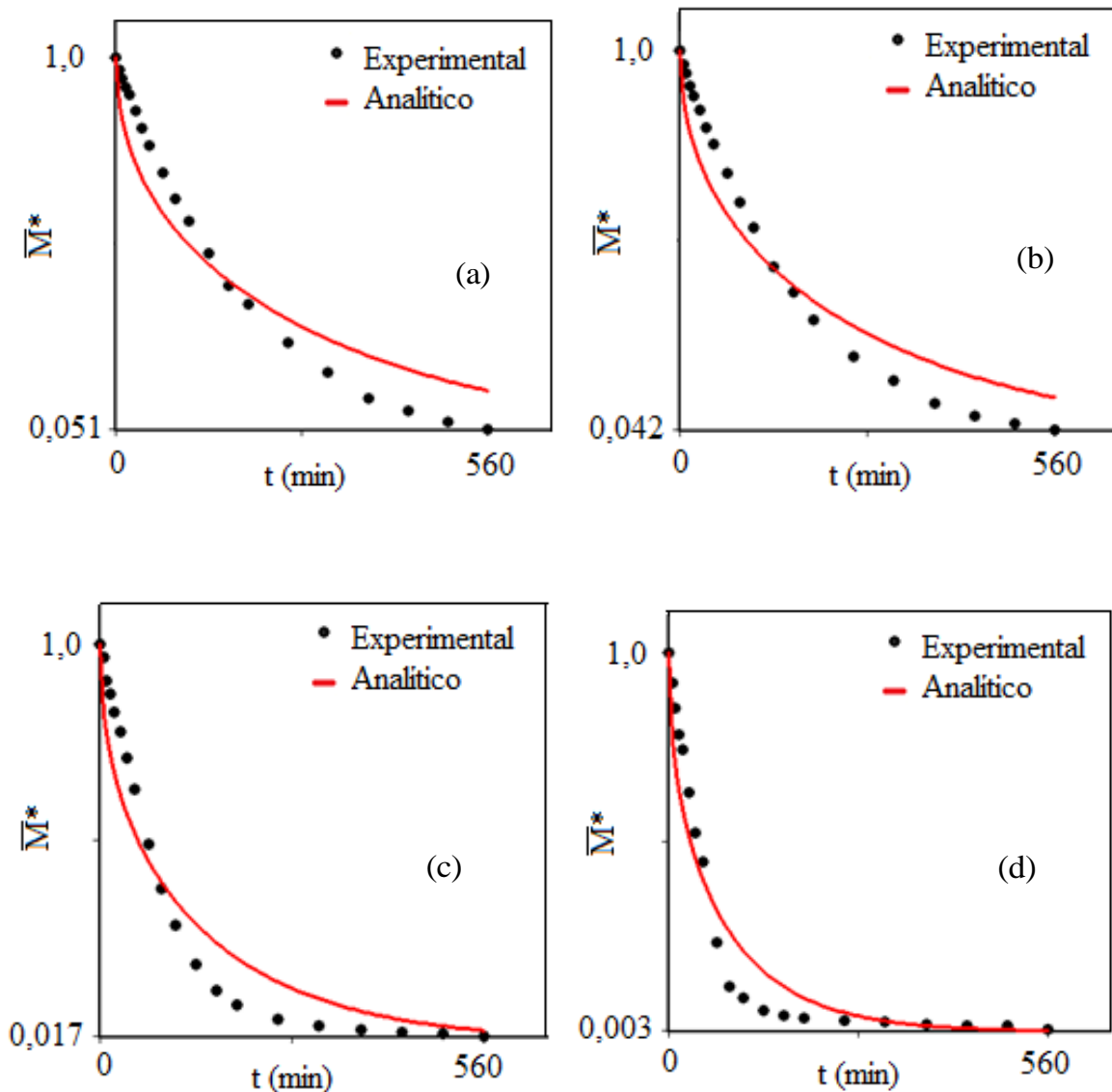


Figura 4.14 – Simulações de secagem para razão de umidade usando a condição de contorno do primeiro tipo para as temperaturas: (a)  $T = 45^\circ\text{C}$ ; (b)  $T = 55^\circ\text{C}$ ; (c)  $T = 65^\circ\text{C}$  e (d)  $T = 75^\circ\text{C}$ .

As simulações da cinética de secagem usando a condição de contorno prescrita (primeiro tipo) utilizando o teor de umidade em base seca ( $M_{bs}$ ) dos grãos de milho empregando o valor obtido para as difusividades efetivas podem ser observadas na Figura 4.15, para cada uma das temperaturas estudadas.

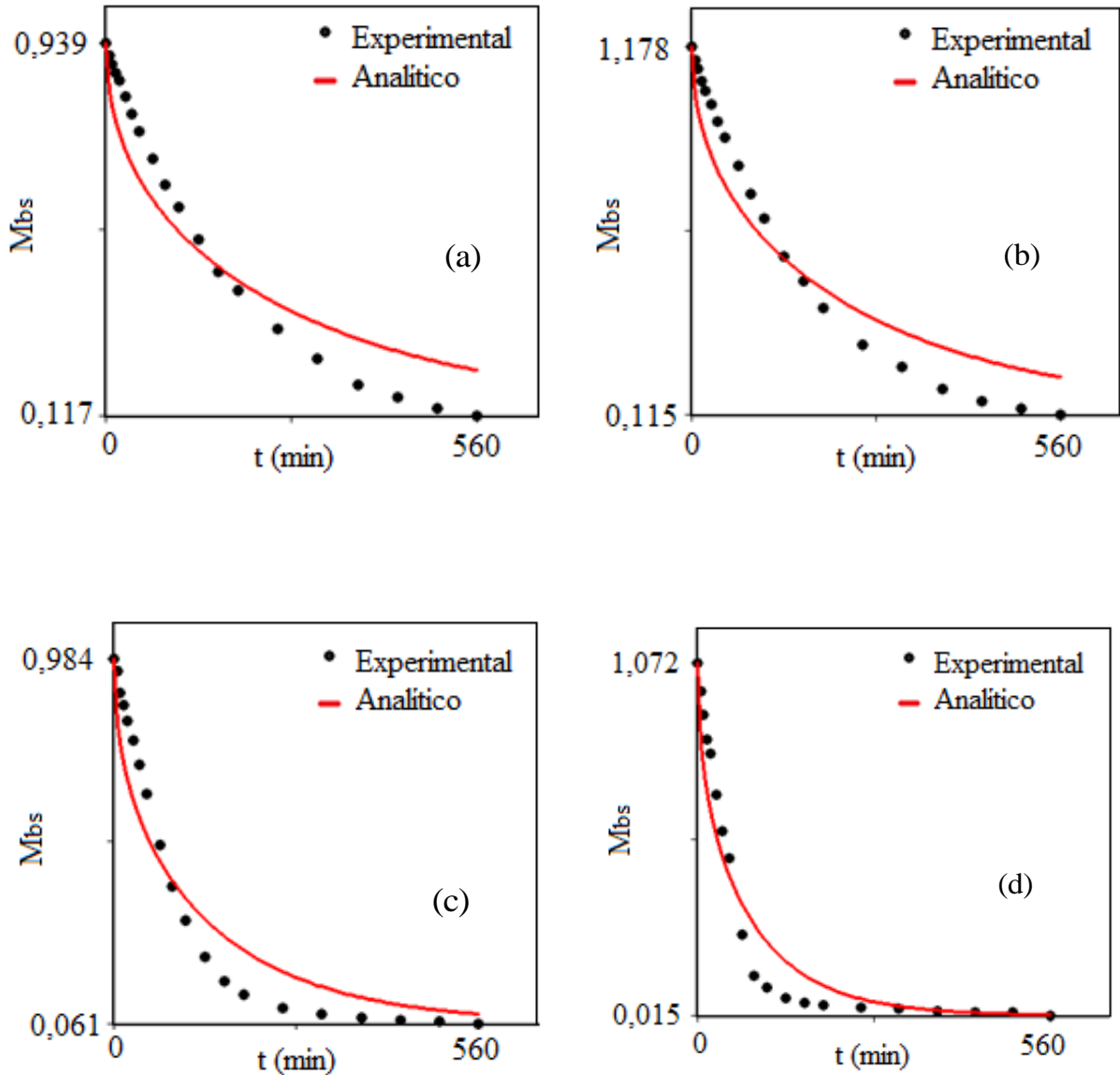


Figura 4.15 – Simulações de secagem para o teor de umidade em base seca usando a condição de contorno do primeiro tipo para as temperaturas: (a)  $T = 45^\circ\text{C}$ ; (b)  $T = 55^\circ\text{C}$ ; (c)  $T = 65^\circ\text{C}$  e (d)  $T = 75^\circ\text{C}$ .

Uma inspeção visual das Figuras 4.14 e 4.15 é possível perceber que as linhas simuladas para condição de contorno do primeiro tipo para todas as temperaturas estudadas não são compatíveis com o conjunto de dados correspondente. Isso sugere que deve existir alguma resistência ao fluxo de água na superfície do grão, tal resistência não foi considerada por este modelo. Assim, a condição de contorno do primeiro tipo deve ser descartada na descrição da secagem de grãos de milho em camada fina.

#### 4.4.2 Cinética de secagem para condição de contorno convectiva (terceiro tipo)

Os resultados obtidos para cinética de secagem da razão de umidade e do teor de umidade em base seca dos grãos de milho utilizando a solução analítica da equação de difusão para a condição de contorno convectiva (terceiro tipo) foram resumidos nas Tabelas 4.12 e 4.13 na qual apresenta os indicadores estatísticos referentes a este modelo.

Tabela 4.12 – Resultados da cinética de secagem da razão de umidade dos grãos de milho descrito pelo *software Convective* para o intervalo de tempo de 560 minutos.

T (°C)	Biot	h (m min <sup>-1</sup> )	D <sub>ef</sub> (m <sup>2</sup> min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	$\chi^2$
45	$1,600 \times 10^{-2}$	$5,1641 \times 10^{-6}$	$5,5836 \times 10^{-7}$	0,99962	$9,3693 \times 10^{-4}$
55	$1,200 \times 10^{-2}$	$5,9850 \times 10^{-6}$	$8,6782 \times 10^{-7}$	0,99952	$1,1466 \times 10^{-3}$
65	$1,750 \times 10^{-3}$	$1,1623 \times 10^{-5}$	$1,1965 \times 10^{-5}$	0,99666	$9,0222 \times 10^{-3}$
75	$1,250 \times 10^{-3}$	$1,8938 \times 10^{-5}$	$2,4945 \times 10^{-5}$	0,99329	$1,7223 \times 10^{-2}$

Tabela 4.13 – Dados experimentais da cinética de secagem dos grãos de milho utilizados na otimização usando a condição de contorno do terceiro tipo para intervalo de 560 minutos.

T (°C)	M <sub>bs</sub>	M <sub>eq</sub>	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
45	0,939	0,117	10,823	8,777	3,460
55	1,178	0,115	12,053	9,977	3,480
65	0,984	0,061	11,407	9,007	3,603
75	1,072	0,015	10,003	8,873	3,293

Uma análise da Tabela 4.12 e uma inspeção visual na Figura 4.16 para todas as temperaturas estudadas permite afirmar que a condição de contorno convectiva (terceiro tipo) é a mais apropriada para descrever a cinética de secagem dos grãos de milho. Pode-se verificar que os ajustes possuem ótimos indicadores estatísticos, além de existir uma excelente concordância entre os dados experimentais e os simulados, desde os instantes iniciais até os finais. Uma característica particular da condição de contorno do terceiro tipo é evidenciada através da observação dos valores muito baixos do qui-quadrado em todas as secagens realizadas, quando comparado com a condição de contorno do primeiro tipo.

Verifica-se, usando a condição de contorno do terceiro tipo que surge um parâmetro muito importante para extrair informação sobre a distribuição de umidade durante a cinética de secagem, que é o número de Biot apresentado na Tabela 4.12. Supreendentemente os valores encontrados nas secagens realizadas foram muito baixos. Quanto mais baixo for o número de Biot, mais homogênea é a distribuição de umidade dentro do grão, o que favorece um aumento na qualidade final do produto (CHEN et al., 2001). Analisando os dados extraídos do trabalho de Addo *et al.* (2006), pode-se evidenciar a confirmação do número de Biot muito baixo, da ordem de  $10^{-3}$ , números que comprovam e dão consistência aos resultados apresentados no presente trabalho. Este resultado pode ser em consequência da baixa permeabilidade da superfície externa do grão.

Comparando-se os dois modelos de difusão, pode-se verificar que, para as secagens propostas no presente estudo, os parâmetros estatísticos e as curvas de secagens obtidas através do *software* “Convective” (condição de contorno do terceiro tipo) se ajustaram muito bem aos dados experimentais para todas as temperaturas testadas, confrontadas com as curvas obtidas pelo “Prescribed” (condição de contorno do primeiro tipo).

Além disso, os indicadores estatísticos obtidos nas otimizações com condição de contorno do terceiro tipo foram os melhores dentre os modelos analisados, incluindo todos os modelos empíricos estudados na presente pesquisa.

As simulações da cinética de secagem usando a condição de contorno convectiva (terceiro tipo) utilizando da razão de umidade ( $\bar{M}^*$ ) dos grãos de milho empregando o valor obtido para as difusividades efetivas ( $D_{ef}$ ) e coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ) podem ser observadas na Figura 4.16, para cada uma das temperaturas estudadas.

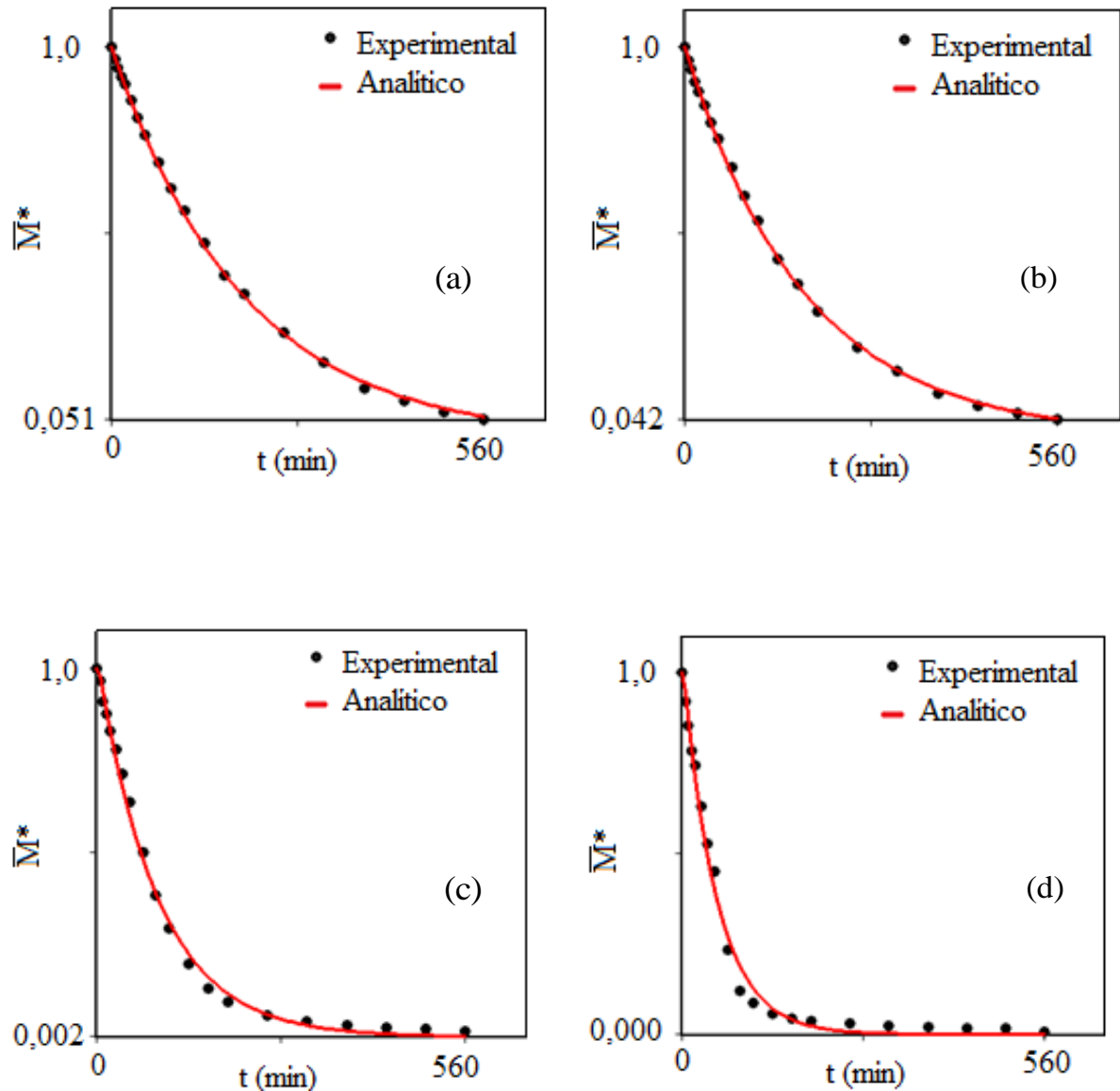


Figura 4.16 – Simulações de secagem para a razão de umidade usando a condição de contorno do terceiro tipo para as temperaturas: (a)  $T = 45^\circ\text{C}$ ; (b)  $T = 55^\circ\text{C}$ ; (c)  $T = 65^\circ\text{C}$  e (d)  $T = 75^\circ\text{C}$ .

As simulações da cinética de secagem usando a condição de contorno convectiva (terceiro tipo) utilizando o teor de umidade em base seca ( $M_{bs}$ ) dos grãos de milho empregando o valor obtido para as difusividades efetivas ( $D_{ef}$ ) e coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ) podem ser observadas na Figura 4.17, para cada uma das temperaturas estudadas.

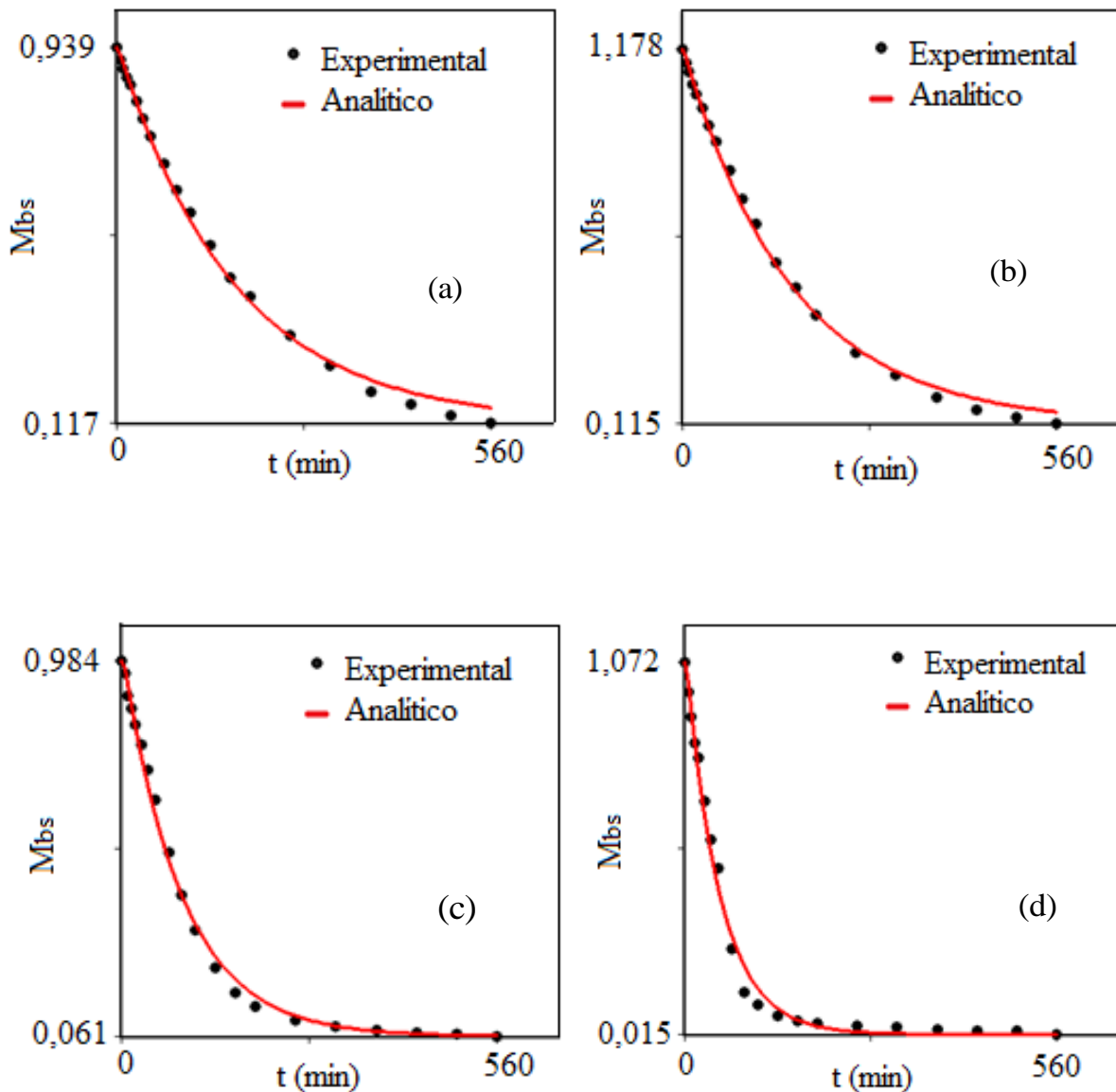


Figura 4.17 – Simulações de secagem para o teor de umidade em base seca usando a condição de contorno do terceiro tipo para as temperaturas: (a)  $T = 45^{\circ}\text{C}$ ; (b)  $T = 55^{\circ}\text{C}$ ; (c)  $T = 65^{\circ}\text{C}$  e (d)  $T = 75^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.5 Considerações sobre os modelos numéricos e analíticos

Verificou-se, na seção anterior, que a condição de contorno do terceiro tipo é a mais apropriada para descrever as cinéticas das secagens contínua dos grãos de milho. A partir deste resultado será analisado se a variação das dimensões do milho é significativa na descrição do processo de secagem. Como a solução analítica é dada por uma série infinita, tal série é truncada e, em geral, poucos termos são usados na determinação da difusividade de água por ajuste de curvas (TELLO-PANDURO et al., 2004; DOYMAZ, 2005), o que é outra simplificação. Naturalmente, as simplificações apontadas anteriormente têm um custo com relação à precisão dos resultados obtidos na determinação da difusividade e, conseqüentemente, na descrição da cinética de secagem.

As geometrias complexas em geral, requerem soluções numéricas para a equação de difusão (GASTÓN et al., 2002; GASTÓN et al., 2003; WU et al., 2004). A grande vantagem das soluções numéricas, em relação as soluções analíticas, é que as primeiras possibilitam incluir volume e difusividade variáveis no modelo a ser estudado (SILVA et al., 2009b).

Não foi encontrado, na literatura, trabalhos que estudem a cinética de secagem dos grãos de milho utilizando soluções numéricas tridimensional em coordenadas cartesianas. Mas para que tal solução possa ser usada na determinação da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), é necessário que a solução numérica seja acoplada a um otimizador. A finalidade do otimizador é possibilitar a determinação dos parâmetros da função proposta para difusividade, de forma que a solução numérica produza resultados para a cinética de secagem o mais próximo possível dos dados experimentais.

##### 4.5.1 Resultados do modelo numérico

De maneira equivalente ao que foi descrito na modelagem analítica apresentada na seção 4.4.2 do processo de secagem convectiva utilizando a condição de contorno do terceiro tipo, propõem-se, neste trabalho, um modelo difusivo numérico tridimensional (com condição de contorno do terceiro tipo) para a descrição da secagem convectiva dos grãos de milho da variedade 1051, no qual se considera inicialmente os parâmetros de processo e as dimensões das amostras dos grãos de milho constantes no transcurso do processo.

A estimativa dos parâmetros de processos para o modelo numérico foi realizada acoplando-se as soluções numéricas da equação de difusão ao otimizador, conforme mencionado na seção 4.5. Neste caso, foi utilizada uma malha com (15 x 20 x 25) volumes de controle com 560 números de passos no tempo. Essa escolha foi feita com base em testes preliminares não reportados neste trabalho.

A Tabela 4.14 apresenta os resultados dos parâmetros de processos obtidos por otimização. Nesta tabela também são apresentados os indicadores estatísticos qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Como os pesos estatísticos dos pontos experimentais não foram determinados no experimento, eles foram considerados iguais a 1, o que significa que todos os pontos experimentais têm o mesmo peso.

Tabela 4.14 – Parâmetros de processos encontrados através da simulação usando o modelo numérico para as temperaturas: (a)  $T = 45^\circ\text{C}$ , (b)  $T = 55^\circ\text{C}$ , (c)  $T = 65^\circ\text{C}$  e (d)  $T = 75^\circ\text{C}$ .

T ( $^\circ\text{C}$ )	$D_{\text{ef}}$ ( $\text{m}^2 \text{min}^{-1}$ )	h ( $\text{m min}^{-1}$ )	$R^2$	$\chi^2$
45	$5,0034 \times 10^{-7}$	$5,1724 \times 10^{-6}$	0,99964	$9,4610 \times 10^{-4}$
55	$7,7675 \times 10^{-7}$	$6,0219 \times 10^{-6}$	0,99953	$1,1483 \times 10^{-3}$
65	$6,5062 \times 10^{-6}$	$1,0731 \times 10^{-5}$	0,99598	$1,4142 \times 10^{-2}$
75	$3,7289 \times 10^{-5}$	$1,7593 \times 10^{-5}$	0,99212	$2,2014 \times 10^{-2}$

Realizando uma comparação entre as Tabelas 4.12 e a Tabela 4.14, pode-se verificar que os valores dos parâmetros de processos e dos indicadores estatísticos podem ser considerados equivalentes para todas as temperaturas estudadas. Nota-se, que os valores do  $R^2$  apresentados na Tabela 4.14 obtidos através do modelo numérico para as temperaturas de 45 e  $55^\circ\text{C}$  são melhores do que os valores obtidos pelo modelo analítico, contudo analisando as tabelas para todas as temperaturas os valores para esse indicador podem ser considerados análogos. Com relação a difusividade efetiva de massa e o coeficiente de transferência convectivo para ambas as temperaturas, os valores são considerados compatíveis.



As simulações da cinética de secagem usando o modelo numérico tridimensional em coordenadas cartesianas utilizando 20 pontos experimentais para razão de umidade ( $M^*$ ) e empregando o valor obtido para as difusividades efetivas ( $D_{ef}$ ) e coeficiente de transferência convectiva de massa ( $h$ ) podem ser observadas na Figura 4.18, para cada uma das temperaturas estudadas.

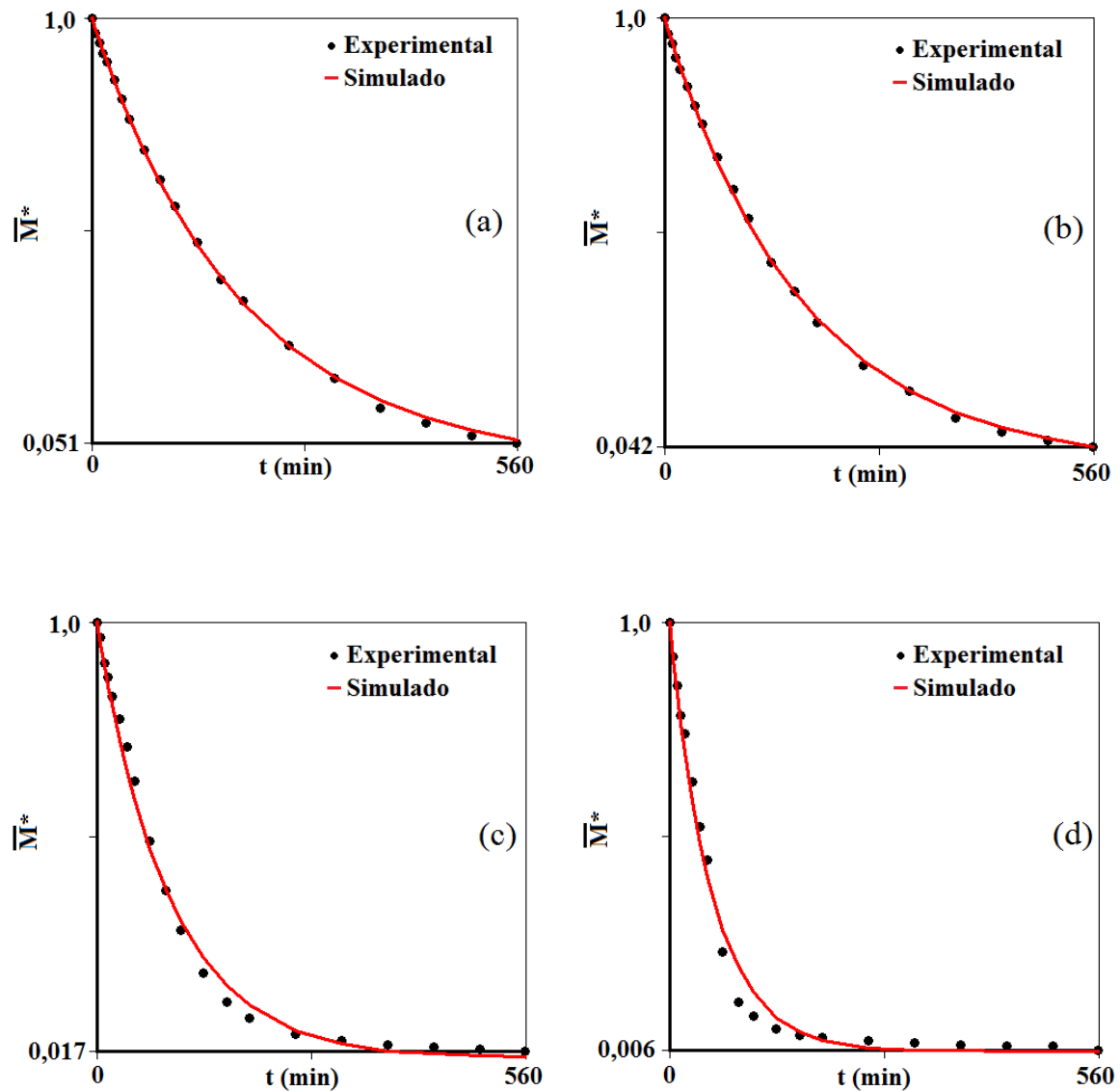


Figura 4.18 – Simulações da cinética de secagens usando o modelo numérico para as temperaturas: (a)  $T = 45^\circ\text{C}$ ; (b)  $T = 55^\circ\text{C}$ ; (c)  $T = 65^\circ\text{C}$  e (d)  $T = 75^\circ\text{C}$ .

Uma análise dos resultados verificados a partir da Tabela 4.14 e uma inspeção visual na Figura 4.18 para todas as temperaturas estudadas permite afirmar que o modelo analítico e numérico da solução da equação de difusão tridimensional com condição de contorno do terceiro tipo são equivalentes. Observa-se em todos os experimentos que o processo de secagem se deu no período de taxa de secagem decrescente, não sendo identificados períodos de taxa de secagem constante. Pode-se verificar que os ajustes dos dois modelos possuem ótimos indicadores estatísticos, além de existir uma excelente concordância entre o modelo analítico e o numérico, desde os instantes iniciais até os finais.

Infere-se que a desvantagem da solução analítica é imposta através do volume e dos parâmetros termofísicos constantes, durante o processo de secagem. Mas mesmo quando tais parâmetros forem variáveis, os resultados obtidos com a presente metodologia podem ser utilizados como valores iniciais em outros processos de otimização que não incluem estas restrições.

A partir dos resultados apresentados nesta seção, esperava-se que o modelo numérico apresentasse indicadores estatísticos superiores aos valores obtidos através do modelo analítico, mas o que ocorreu foi uma equivalência entre tais resultados. Verificou-se através da simulação utilizando a solução analítica com condição de contorno convectiva para as quatro temperaturas estudadas, valores referentes aos números de Biot muito baixos.

Isso pressupõe que a descrição da cinética de secagem do produto estudado no presente trabalho, pode ser feita usando apenas um termo da série, tendo como base uma comparação dos resultados referentes ao número de Biot, confrontando-os com os valores apresentados na Tabela 3.2 da Seção 3.

Este procedimento dispensa o cálculo das raízes através da equação característica e apresenta-se no limiar de um processo difusivo, o que permite concluir que um simples modelo empírico ou semi-empírico usando um ou dois termos, explicaria o fenômeno com resultados equivalentes aos modelos numérico e analítico para a cinética de secagem desse produto, podendo-se desprezar os parâmetros variáveis da difusividade e do encolhimento. As Tabelas A.5.1 a A.5.4 apresentam a evolução das dimensões durante a secagem dos grãos do milho para todas as temperaturas estudadas com as condições do ar de secagem e do ar ambiente indicados na Tabela A.1.

Há inúmeras pesquisas na literatura que utilizam apenas o primeiro termo da série para representar a solução analítica da equação de difusão, em geometrias específicas, com condição de contorno do terceiro tipo, para modelar a cinética de secagem de grãos. Nestes casos, a estimativa da difusividade efetiva de massa é feita linearizando-se o único termo considerado, através da aplicação do logaritmo natural, e ajustando-se a equação resultante, aos dados experimentais, por meio de regressão linear. A difusividade é encontrada através da inclinação da reta obtida (RASTOGI e RAGHAVARAO, 2004; FALADE et al., 2007). Alguns estudos, no entanto, adotam um número maior de termos da série, juntamente com uma regressão não linear, para estimativa da difusividade (GARCIA et al., 2007; RUIZ – LÓPEZ et al., 2010; BARBOSA JÚNIOR et al., 2013). Apesar desses métodos descrever bem boa parte do processo, não produzem bons resultados para descrição nos tempos iniciais. No entanto, se o número de termos for muito alto, o ajuste de curva não é prático, pois seria necessário escrever toda expressão no software utilizado. Neste sentido, alguns trabalhos utilizam soluções analíticas da equação de difusão acopladas a otimizadores para a determinação dos parâmetros de processo da cinética de secagem de grãos e alguns vegetais (SILVA et al., 2012).

Foram usados por Lima (1999) modelos matemáticos bidimensionais analíticos e numéricos para simular o fenômeno da difusão transiente em sólidos esferoidais prolatos. Para solução numérica, foi utilizado o método dos volumes finitos, com uma formulação totalmente implícita. A equação de difusão foi discretizada e resolvida considerando o fenômeno com e sem retração. Os modelos citados foram aplicados para descrever a secagem de banana, e os resultados obtidos, comparados aos dados experimentais.

Verificou-se, no presente trabalho, uma característica importante da solução da equação de difusão usando o modelo numérico e analítico com condição de contorno do terceiro tipo, confirmada através da observação dos valores muito baixos do qui-quadrado em todas as simulações realizadas.

A partir desses valores, é possível verificar um parâmetro adimensional que desempenha um papel fundamental nos problemas difusivos que envolvem efeitos convectivos na superfície do produto, muito importante para extrair informação sobre a distribuição de umidade durante a cinética de secagem, que é o número de Biot, que surpreendentemente os valores encontrados nas secagens e nas simulações realizadas foram muito baixo e quanto mais baixo for o número de Biot, mais homogênea é a distribuição de umidade dentro do grão.

Khatcharourian e Oliveira (2006), alegam que para valores do número de Biot da transferência de massa suficientemente grandes ( $Bi > 100$ ) a taxa de aquecimento do grão é determinada pela transferência de massa e/ou calor no interior do grão (denominado de problema interno, onde se considera as resistências internas). Para pequenos valores do número de Biot ( $Bi < 0,1$ ) existe uma distribuição quase uniforme de massa e/ou temperatura no grão, podendo-se considerar o problema reduzido à temperatura da superfície. Nesse caso, a taxa de aquecimento do grão é determinada pela taxa de transferência de calor do ar para a superfície do grão (denominado de problema externo, considerando-se as resistências externas). Se o número de Biot estiver compreendido entre ( $0,1 < Bi < 100$ ), deve-se considerar ambos os processos, interno e externo.

Neste trabalho, os resultados referentes ao pequeno número de Biot sugerem que, é razoável supor uma distribuição de umidade praticamente uniforme no interior do grão, em qualquer instante de tempo, durante todo processo difusivo. Para ilustrar a afirmação anterior, a Figura 4.19 apresenta as distribuições de umidade, para o experimento de secagem convectiva usando a temperatura de 45 °C, para as amostras de milho. A obtenção da distribuição de umidade nesses instantes de tempo foram obtidos por meio do software “*Contour plots*” (SILVA, 2010).

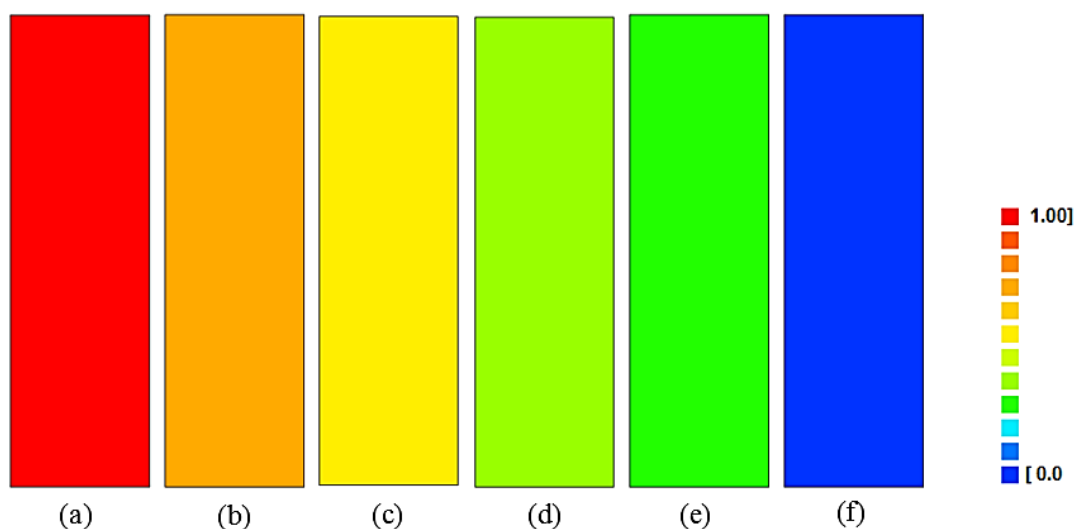


Figura 4.19 – Distribuição de umidade para o experimento de secagem das amostras de milho a 45°C para os instantes de tempo (em minutos) de: (a) 0; (b) 30; (c) 60; (d) 120; (e) 240; (f) 560.

Deve-se observar a partir da Figura 4.19, que, para todos os tempos verificados, a distribuição de umidade é praticamente uniforme no interior do grão e que, em nenhum tempo intermediário, o contorno entra em equilíbrio com o meio. Esse tipo de informação previsto pelo modelo de difusão é importante porque, se as distribuições de umidade não fossem quase uniformes, tais distribuições gerariam tensões que poderiam danificar o produto (SILVA et al. 2015).

A Figura 4.20 apresenta o gradiente de umidade para as temperaturas de 45, 55, 65 e 75°C para o experimento de secagem convectiva das amostras de milho para um instante de tempo de 40 minutos. Conforme pode ser verificado através da ilustração, para um mesmo instante, à medida que a temperatura aumenta, a secagem dos grãos se processa mais rapidamente.

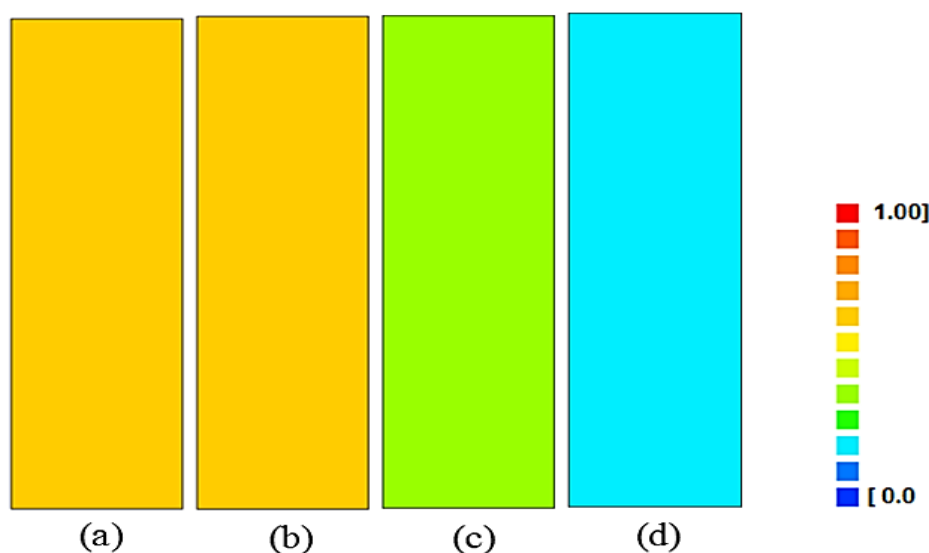


Figura 4.20 – Distribuição de umidade para os experimentos de secagem no instante de tempo de 40 minutos para as temperaturas de: (a) 45°C; (b) 55°C; (c) 65°C; e (d) 75°C.

## 5 CONCLUSÕES

Neste capítulo apresenta-se as principais conclusões com relação às pesquisas já realizadas neste trabalho. Será apresentado o melhor modelo difusivo e a condição de contorno adequada para descrever os processos de secagem. Apresenta-se ainda, neste trabalho, a validação e a consistência do programa computacional elaborado para a simulação e estimativa de parâmetros em modelos de difusão de massa.

### 5.1 Modelos empíricos utilizados para descrever a cinética de secagem

De acordo com os resultados apresentados, pode-se concluir, a respeito dos modelos empíricos utilizados para verificar a cinética de secagem dos grãos de milho, o que se segue.

- Entre os modelos empíricos verificados, o modelo 1 (Page) foi o que apresentou os melhores resultados (com coeficientes de determinação e qui-quadrado próximos de 0,99972 e  $6,77 \times 10^{-4}$ , respectivamente), com valores ótimos para todas as temperaturas do ar de secagem que foram estudadas;
- Verifica-se, a partir dos resultados, que os coeficientes de determinação obtidos para os dois modelos que apresentaram os melhores resultados, Page e Silva et alii, para as quatro temperaturas estudadas, foram maiores do que  $R^2 = 0,994$ ;
- Constatou-se, para todos os modelos empíricos avaliados, que, com o aumento da temperatura do ar de secagem, ocorre maior taxa de remoção de água do produto, evidenciando o aumento da taxa de secagem dos grãos de milho;
- Infere-se que esses modelos, geralmente, baseiam-se em variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Entretanto não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior dos grãos e consideram que todo o processo de secagem ocorre somente no período de taxa decrescente.

## 5.2 Validação do programa computacional desenvolvido

- A partir dos resultados verificados, pode-se constatar que os testes de validação indicam consistência do programa computacional utilizado;
- O programa desenvolvido, de acordo com os testes conduzidos, apresentou-se como uma ferramenta adequada para o estudo da secagem convectiva de grãos de milho por meio de soluções numéricas da equação de difusão, em coordenadas cartesianas, com geometria tridimensional com condição de contorno de terceiro tipo;
- A utilização da simetria, como forma de validação, assim como meio para a redução do tempo de processamento e para a economia de memória, mostrou-se adequado para a geometria estudada;
- O programa desenvolvido é estável, já que o mesmo pode solucionar problemas de difusão que, além de considerar a geometria tridimensional dos corpos sólidos com a forma de paralelepípedo para condições de contorno do terceiro tipo, podem-se incluir variações dimensionais e ainda propriedades termofísicas variáveis;
- A partir da análise dos resultados obtidos para a validação da solução proposta, é possível concluir que o código computacional desenvolvido é adequado para descrever o processo de difusão em sólidos porosos com a geometria aproximada de um paralelepípedo num espaço tridimensional, dentre os quais podem ser destacados: secagem, umidificação, aquecimento, resfriamento e, em certos casos, congelamento;
- A eficiência do código computacional desenvolvido está relacionada com a rapidez na solução da equação de difusão, que dependerá de vários fatores, dentre os quais podem ser destacados o tamanho da malha e a forma geométrica, o número de passos no tempo, o valor dos parâmetros de transporte, dentre outros. Nas simulações realizadas para validar o código computacional desenvolvido, o tempo total do processo difusivo foi estipulado em 100 s, e o

número de passos de tempo foi de 500, para uma malha ortogonal de 7x3x3, utilizando os parâmetros da Tabela 4.8. O intervalo de tempo gasto pode ser considerado razoável, avaliando que o programa foi executado num computador portátil convencional, sem requerer memória adicional.

### 5.3 Modelos difusivos com solução analítica

- O modelo de difusão com condição de contorno prescrita (primeiro tipo) não foi adequado para descrever a cinética de secagem de milho em camada fina;
- Verifica-se que o modelo difusivo com condição de contorno convectiva (terceiro tipo) é adequado para descrever a cinética de secagem para todas as condições de secagem;
- Pode-se verificar, que, usando a condição de contorno convectiva, os ajustes possuem ótimos indicadores estatísticos, além de existir uma excelente concordância entre os dados experimentais e os simulados;
- Realizando-se uma comparação entre os dois modelos difusivos, pode-se verificar que, para as secagens propostas no presente estudo, os parâmetros estatísticos e as curvas de secagens obtidas através do software utilizando a condição de contorno do terceiro tipo, se ajustaram muito bem aos dados experimentais para todas as temperaturas testadas, confrontadas com as curvas obtidas usando a condição de contorno do primeiro tipo;
- Para as quatro temperaturas investigadas, nas condições descritas, foi possível detectar que, quanto maior a temperatura, maior a rapidez na secagem, entretanto defeitos significativos na aparência dos grãos de milho estudados foram observados, causados pelo aumento da temperatura no processo de secagem;
- Pode-se verificar um número de Biot muito baixo na secagem contínua dos grãos de milho. Esse efeito pode ser interpretado como uma distribuição mais homogênea de umidade durante o processo de secagem;



#### 5.4 Modelo difusivo com solução numérica

- Verifica-se, através do modelo numérico com difusividade e volume constante usando a condição de contorno convectiva (terceiro tipo), que existe uma adequada descrição da cinética de secagem para todas as condições experimentais;
- Pode-se evidenciar uma concordância entre os modelos analíticos e numéricos com difusividade e volume constante usando condição de contorno convectiva (terceiro tipo) para descrever a cinética de secagem dos grãos de milho da variedade 1051;
- Observa-se que os valores encontrados para o número de Biot nas otimizações realizadas foram muito baixos e quanto mais baixo for o número de Biot, mais homogênea é a distribuição de umidade dentro do grão, o que evidencia que o processo está no limiar de um processo difusivo;
- Conclui-se que o LS Optimizer (programa de otimização) utilizado para determinação dos parâmetros de processo produziu resultados consistentes com os valores esperados;
- Infere-se, neste estudo, que a solução analítica com condição de contorno convectiva apresentada na seção 4.4.2 poderia ser substituída pela solução numérica que permite simular processos de difusão envolvendo difusividade constante e variável;
- Evidencia-se que a metodologia numérica apresentada neste estudo também pode ser aplicada a outros produtos em forma de paralelepípedo e difusividade constante e variável.

### **5.5 Sugestão para trabalhos futuros**

- Criação de um algoritmo de otimização, para ser incorporado ao programa, visando à redução do tempo de execução na determinação dos parâmetros de processo a partir de dados experimentais;
- Estudo da cinética de secagem de grãos de milho usando o processo de secagem intermitente para reduzir os gastos com a energia;
- Aplicar as ferramentas desenvolvidas a secagens de diferentes produtos, em outros processos difusivos;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abimilho – Associação Brasileira das Indústrias Moageiras de Milho. **Milho: o cereal que enriquece a alimentação humana.** [Apucarana], 2013. Disponível em: <http://www.abimilho.com.br>. Acessado em: 13 abr. 2014.

Abimilho. Brasil: **estimativa de consumo por segmento.** [Apucarana], 2006. Disponível em: <http://www.abimilho.com.br/estatistica4.htm>. Acesso em: 13 abr. 2014.

Addo, A.; Bart-Plange, A.; Dzisi, K. Water Absorption characteristics of Obatanpa and Mamaba Maize Hybrids (*Zea mays*). **International Journal of Food Engineering**, v. 2, n. 3, p. 1556-3758, 2006.

Afonso Júnior, P. C. ; Correa, P. C.; Andrade, E. T. Análise da variação das propriedades físicas e concentração dos grãos de milheto (*Pennisetum glaucum*), durante o processo de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa. v. 25, n. 1, p.15-21, 2000.

Akpinar, E.; Bicer, Y. Modeling of the drying of eggplants in thin-layers. **Internacional Journal of Food Science and Techonology**, v. 40, n. 3, p. 273-281, 2005.

Almeida, G. S. **Simulação e experimentação da secagem de cerâmica vermelha em sistemas térmicos industriais.** Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil. 191 p. 2009.

Alves, W.M.; Faroni, L.R.D.; Queiroz, D.M. de; Corrêa, P.C.; Galvão, J.C.C. Qualidade dos grãos de milho em função da umidade de colheita e da temperatura de secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 469-474, 2001.

Araújo, R.F. **Efeito da colheita mecanizada nas perdas quantitativas e qualitativas de sementes de milho (*Zea mays*, L.).** Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências e Tecnologia, UFV, Viçosa, MG, Brasil. 103 p. 1995.

Bakker-Arkema, F.W.; Lerew, L.E.; Brook, R.C.; Brooker, D.B. **Energy and capacity performance evaluation of grain dryers**. St. Joseph, Michigan, ASAE, (ASAE Paper, 78-3523), 13p. 1978.

Bakker-Arkema, F. W. Grain quality and management of grain quality standards. **In: International symposium of grain conservation**. 1993, Canela. Anais... Porto Alegre: Plus Comunicações, 1994. p.3-11.

Balaban, M. Effect of volume change in foods on the temperature and moisture content predictions of simultaneous heat and moisture transfer models. **Journal of Food Process Engineering**, v. 12, n. 1, p. 67-88, 1989.

Barbosa Júnior., J.L.; Mancini, M.C.; Hubinger, M.D. **Mass transfer kinetics and mathematical modelling of the osmotic dehydration of orange-fleshed honeydew melon in corn syrup and sucrose solutions**. International Journal of Food Science and Technology, v. 48, n. 5, p. 2463–2473, 2013.

Baronas, R.; Ivanauskas, F.; Sapagovas, M. Modelling of wood drying and an influence of lumber geometry on drying dynamics. **Nonlinear Analysis: Modelling and Control**, Vilnius, IMI, v. 4, n.4, p. 11-22, 1999.

Baronas, R.; Ivanauskas, F.; Juodeikiene, I.; Kajalavicius, A. Modelling of moisture movement in wood during outdoor storage. **Nonlinear Analysis: Modelling and Control**, v.6, n. 2, p. 3-14, 2001.

Baini, R. and Langrish, T. A. G. “Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas”, **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 5, p. 330-343. 2007.

Batista, V. R.; Nascimento, J. J. S.; Lima, A. G. B. Secagem e queima de tijolos cerâmicos maciços e vazados incluindo variações dimensionais e danos estruturais. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 3.1, p. 46-61 ISSN 1809-8797, 2008.

Baudet, L.M.L.; Villela, F.A.; Cavariani, C. Princípios de secagem. **Seed News**, Pelotas-RS, n.10, p.20-27, 1999.

Berbert, P. A.; Queiroz, D. M.; Silva, J. S. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 6, n. 3, p. 167-173, 1995.

Belessiotis, V.; Delyannis, E. Solar drying. **Solar Energy**, v. 85, n. 8, p. 1665-1691, 2011.

Berger, D., Pei, D. C. T. Drying of hygroscopic capillary porous solids: A theoretical approach, **Int. J. Heat Mass Transfer**, v. 16, n. 3, p. 293-302, 1973.

Bevington, P.R.; Robinson, D.K. **Data reduction and error analysis for the physical sciences**. 2<sup>nd</sup> ed. Boston: WCB/McGraw-Hill, 1992. 328 p. 1992.

Bird, R. B.; Stewart, W. E.; Lightfoot, E. N. **Transport phenomena**. 2<sup>nd</sup> Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. 912 p. 2001.

Bortoli, A. D. L. **Introdução à dinâmica de fluidos computacional**. Editora da Universidade do Rio Grande do Sul, 134 p. 2000.

Brieger, A.H.D., Gurgel, J.T.A., Paterniani, E., Alleoni, M.R. Races of maize in Brazil and other eastern south american countries. **National Academy of Sciences-National Research Council Publication**, v. 1, n. 593, p. 238-353, 1958.

Britannica, **Encyclopaedia Britannica**, Inc 2006. The outer layers and internal structures of a kernel of corn. Disponível em: <<http://global.britannica.com/EBchecked/topic/103350/cereal-processing>>. Acesso em: 10 ago. 2014.

Brod, F. P. R. **Avaliação de um secador vibro-fluidizado**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 336 p. 2003.

Brooker, D.B.; Bakker-Arkema, F.W.; Hall, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: van Nostrand Reinhold, 450p. 1992.

Cadé, M. A.; Nascimento, J. J. S.; Lima, A. G. B. Secagem de tijolos cerâmicos vazados: uma aproximação por volumes finitos. **Revista Matéria**, v. 10, n. 3, p. 433-453, 2005.

Campos, M. D. **O Método de elementos finitos aplicado na simulação numérica de escoamentos de fluidos**. III Bienal da SBM, IME-UFG, 2006.

Cano-Chauca, M.; Ramos, A. M.; Stringheta, P. C.; Marques, J. A.; Silva, P.I. Curvas de Secagem e avaliação da atividade de água da banana passa. **Boletim do CEPPA**, Curitiba, v.22, n.1, p.121-132, 2004.

Carmo, J. E. F. **Fenômenos de difusão transiente em sólidos esferoidais oblatos: secagem de lentilhas**. Tese de Doutorado em Eng. de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil. 139 p. 2004.

Carmo, J. E. F.; Lima, A. G. B. Drying of lentil including shrinkage: a numerical simulation. **Drying Technology**, v. 23, n. 1, p. 1977-1992, 2005.

Carvalho, N. M.; Nakagawa, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 4. ed. Jaboticabal: FUNEP, 588 p. 2000.

Cavariani, C. **Secagem estacionária de sementes de milho com distribuição radial do fluxo de ar**. Tese de Doutorado em Produção Vegetal, Centro de Ciências e Tecnologia, USP, São Paulo, SP, Brasil. 85 p. 1996.

Cavalcanti Mata, M.E.R.M.; Dantas, L.A.; Braga, M.E.D. Programa computacional para simulação de secagem de grãos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.1, n.1, p.33-50, 1999.

Cavalcanti, W. S.; Carvalho, L. H.; Lima, A. G. B. Sorção de Água em Compósitos de Poliéster Insaturado Reforçados com Tecido de Juta e Juta/Vidro: Modelagem, Simulação e Experimentação - **Rev. Mat.**, v. 10, n. 2, p. 479, 2005.

Chen, X.D., Pirini, W., Ozilgen, M. 2001. The reaction engineering approach to modelling drying of thin layer of pulped Kiwifruit flesh under conditions of small Biot numbers. *Chemical Engineering and Processing*, 40(4), 311–320.

Chen, Y.; Burris, J. S. Role of carbohydrates in desiccation tolerance and membrane behavior in maturing maize seed. **Crop Science**, Madison, v. 30, n. 5, p. 971-975, 1990.

Crank, J. **The Mathematics of Diffusion**, Oxford Science Publications, New York. 1992.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, nono levantamento, junho 2015**. Brasília: CONAB, 2015. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=>. Acesso em: 11 de junho de 2016.

Corrêa, P. C; Resende, O.; Martinazzo, A. P.; Goneli, A. L. D.; Botelho, F. M. Modelagem Matemática para a Descrição do Processo de Secagem do Feijão (*Phaseolus Vulgaris* L.) Em Camadas Delgadas. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.27, n.2, p.501-510, maio/ago. 2007.

Dantas, L. A; Mata, M. E. R. M; Duarte, M. E. M. Programa Computacional Dinâmico para Simulação de Secagem de Grãos e Sementes de Milho. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.13, n.3, p.309-318, 2011.

Diamante, L. M.; Ihns, R.; Savage, G. P.; Vanhanen, L. A new mathematical model for thin layer drying of fruits. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 45, n. 9, p. 1956-1962, 2010.

Dincer, I. Moisture transfer analysis during drying of slab woods. **Heat and Mass Transfer**, v. 34, n. 4, p. 317-320, 1998.

Doymaz, I. Drying behaviour of green beans. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 65, n. 1, p. 161-165, 2005.

Doymaz I. Effect of citric acid and blanching pre-treatments on drying and rehydration of Amasya red apples. **Food Bioprod Proc.** v. 88, n. 3, p. 124–132, 2010.

Doretto, L.; Ferrara, D.; Parvoli G.; Rella R.; Sturaro A. Chemical evidence and risks associated with soybean and rapeseed meal fermentation. **Chemosphere**, v. 52, n. 2, p. 1259-1262, 2003.

Elias, M.C. **Secagem e armazenamento de grãos, em média e pequena escala**. 1.ed. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária, 147p. 2000.

Embrapa. **Cultura do milho: sistema de produção**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo 7. ed. set. 2011. Acesso em: 28 dezembro. 2013. Disponível em: [http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho\\_7\\_ed/index.htm](http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_7_ed/index.htm) .

Embrapa Milho – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Introdução e Importância Econômica do Milho**, 2013. Disponível em <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho/importancia.htm>>. Acesso em: 10 dezembro. 2013.

Erenturk, S.; Gulaboglu, M.S.; Gultekin, S. The thinlayer drying characteristics of roseship. **Biosystems Engineering**, Oxford, v.89, n.2, p.159-166, 2004.

Falade, K.O.; Igbeka, J.C.; Ayanwuyi, F.A. **Kinetics of mass transfer, and colour changes during osmotic dehydration of watermelon**. Journal of Food Engineering, v. 80, p. 979–985, 2007.

Farias, V. S. O.; Silva, C. M. D. S.; Souza, J. A. R.; Silva, W. P.; Mata, M. E. R. M. C. Comportamento da secagem de sementes de grão de bico (*cicer arietinum* l.) em camada fina: equação de page e modelo difusivo. **Anais do XXXVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, CD ROOM**, 2009a.

Farias, V. S. O.; Souza, J. A. R.; Silva, W. P.; Neves, G. A.; Lima, A. G. B. Estudo da cinética de secagem de telhas cerâmicas através do modelo de difusão usando solução analítica e método inverso. **Anais do XXXIV ENEMP**, 2009b.

Farias, V. S. O. **Difusão 3D em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas**. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil. 265 p. 2011.

Ferreira, M. M. P. **Desenvolvimento caracterização e secagem de sementes com cobertura artificial**. Dissertação Mestrado. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 235p. 2004.

Fioreze, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos**. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 229 p, 2004.

Fortes, M.; Okos, M. R. Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains. **In: Advances in Drying**, ed. Arum S. Mujundar, Hemisphere Publishing Corporation. Washington. v. 1, n. 2, p. 119-154, 1980.



Foust, A.S.; Wenzel, L.A.; Clump, C.W.; Maus, L.; Andersen, L.B. **Princípios das operações unitárias**. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 670p. 1982.

Gama, F. J. A. **Acoplamento massa-energia na descrição da secagem de produtos cilíndricos**. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil. 225 p. 2014.

Ganesapillai, M.; Regupathi, I.; Murugesan, T. An empirical model for the estimation of moisture ratio during microwave drying of plaster of Paris. **Drying Technology**, v. 26, n. 7, p. 963-978, 2008.

Garcia, D. M.; Barros, A. C. S. A.; Pesker, S. T.; Menezes, N. L. A secagem de sementes. **Ciências Rural**, v. 34, n. 2, p.603-608, 2004.

Garcia, C. C.; Mauro, M. A.; Kimura, M. **Kinetics of osmotic dehydration and air-drying of pumpkins (*Cucurbita moschata*)**. Journal of Food Engineering, v. 82, n. 3, p. 284-291, 2007.

Gastón, A. L.; Abalone, R. M.; Giner, S. A. Wheat drying kinetics. Diffusivities for sphere and ellipsoid by finite elements. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 52, n. 1, p. 313-322, 2002.

Gastón, A. L.; Abalone, R. M.; Giner, S. A.; Bruce, D. M. Geometry effect on water diffusivity estimation in printa-isla verde and broom wheat cultivars. **Latin American Applied Research**, Bahía Blanca, v. 33, n. 1, p. 327-331, 2003.

Gaut, B. S.; Maud, L.T.; Peek, A.; Sawkins, M.C. **Maize as a model for the evolution of plant nuclear genomes**. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, Washington, v.97, n.13, p.7008-7015, 2000.

Geankoplis, C. J. Drying of process materials. **In: Transport processes and unit operations**. Boston: Allyn and Bacon, ed 2, 1983.

Ghazanfari, A.; Emami, S.; Tabil, L. G.; Panigrahi, S. Thin-layer drying of flax fiber: II modeling drying process using semi-theoretical and empirical models. **Drying Technology**. v. 24, n. 12, p. 1637-1642, 2006.

Goneli, A. L. D.; Correa, P. C.; Resende, O.; Reis Neto, S. A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.27, n. 5, p. 135-140, 2007.

Gouveia, J.P.G. de; Almeida, F.A.C. de; Murr, F.E.X. Estudo da difusividade e do encolhimento do gengibre (*Zingiber officinale*, Roscoe) durante a secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. v.1, n.1, p.51- 58, 1999.

Gouveia, D. S.; Ugulino, S. M. P.; Duarte, M. E. M.; Mata, M. E. C. Cinética de feijão preto (*Phaseolus vulgaris*, L.) em secador de bandeja. **Holos**, Natal, v. 1, n. 27, p. 38-48, 2011.

Hall, C.W. Drying and storage of agricultural crops. **Westport: The AVI Publishing Company**, 382 p. 1980.

Henderson, S.M.; Perry, R.L.; Young, J.H. **Principles of process engineering**, 4.ed. St. Joseph, Mic.: ASAE, 353p. 1997.

Henry, P. S. H. Difusion in absorbing media, London, **Proc. R. Soc vol. 171a**, p.215-241, 1939.

Herter, U.; Burris, J. S. Changes in moisture, temperature, and quality of corn seed during high-temperature drying. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 69, n. 3, p. 749-761, 1989a.

Herter, U.; Burris, J. S. Effect of drying rate and temperature on drying injury of corn seed. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 69, n. 3, p. 763-774, 1989b.

Heuert, K. **Grãos da semente ao consumo**. Ano III, nº15, jun., 2004. p. 29-31.

Hii, C. L.; Law, C. L.; Cloke, M. Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. **Journal of Food Engineering**, v. 90, n. 2, p. 191-198, 2009.

Hoseney, R. C. Starch. In: - Principles of cereal: Science and technology. 2<sup>nd</sup> ed. St. Paul: **American Association of Cereal Chemists**, v. 2, n. 5, p. 29-64. 1994.

Hougen, O. A. Limitation of diffusion equation in drying, **Trans. AIChE**, v. 36, n. 2, p. 183-206, 1940.

Incropera, F. P e Dewitt, D. P., **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 455 p. LTC, Rio de Janeiro. 2001.

Ismail, M. A.; Douglass, M. P.; Stenning, B. C. Modelling and simulation heat transfer in wheat stored in a simulated sealed pit. **Journal of Food Engineering**, v. 4, n. 3, p. 104-118, 2008.

Jayas, D.S.; Cenkowski, S.; Pabis, S.; Muir, W. Review of thin-layer drying and wetting equations. **Drying Technology, New York**, v.9, n.3, p.551-588, 1991.

Jayas D. S.; White, N. D. G. Storage and drying of grain in Canada: low cost approaches. **Food Control** **14**, p. 255-261. 2003.

Jian-Feng, Z.; Ji-You, G., Ying-Chun, C. Analysis of moisture diffusivity of larch timber during convective drying condition by using Crank's method and Dincer's method. **Journal of Forestry Research**, v. 18, n. 3, p. 199-203, 2007.

Johnson L. Corn: The major cereal of the Americas. In: Handbook of cereal science and technology. 2<sup>nd</sup> Ed. Kulp K and Ponte JG Jr (Ed). **New York: Marcel Dekker, Inc.**, v. 2, n. 6, p. 31-80, 2000.

Jones, C.A. **C4 Gasses and Cereals: Growth, development and stress response**. New York: Wily, 255 p. 1985.

Kaletka, A. e Górnicki, K. Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer. **International Journal of Food Science and Technology**, v.45, n. 5, p. 891-898, 2010.

Keey, R. B. Drying: Principles and practice. New York: **Pergamon Press**. 358p. 1972.

Khatchatourian, O. A.; Oliveira, F. A. **Mathematical Modelling of Airflow and Thermal State in Large Aerated Grain Storage**. Biosystems Engineering, v. 95, n. 2, p. 159-169, 2006.

Khatchatourian, O. A; Toniazzi, N. A; Gortyshov, Y. F. Simulation of airflow in grain bulks under anisotropic conditions. **Biosystems Engineering**, v. 3, n. 4, p. 205–215, 2009.

Kreyger, J. Practical observations on the drying of seed. **Seed Science and Technology**. Zurich, v. 1, n. 1, p. 645-670, 1973.

Kulasiri D, Woodhead I On modelling the drying of porous materials: analytical solutions to coupled partial differential equations governing heat and moisture transfer. **Mathematical Problems in Engineering**, p.275-291. 2005.

Kumar, R.; Jain, S.; Garg, M. K. Drying behavior of rapeseed under thin layer conditions. **Journal of Food Science and Technology**, v. 47, n. 3, p. 335-338, 2010.

Lacerda Filho, A.F. de. **Avaliação de uma unidade de beneficiamento de sementes de milho (Zea mays, L.)**. Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola e Armazenamento, UNESP, Botucatu, SP, Brasil. 197p. 1998.

Lang, W.; Sokhansanj, S.; Rohani, S. Dinamic shrinkage and variable parameters in Bakker-Arkema's mathematical simulation of wheat and canola drying. **Drying Technology**, v.12 n.7, p. 1687-1708, 1994.

Lasseran, J.C. Princípios gerais de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.3, n.3, p. 17-46. 1978.

Lima, G.J.M.M.; Souza, O.W.; Bellaver, C. et al. Determinação da composição química e do valor energético de silagem de grão de milho para suínos. **In: Congresso Nacional de Milho e Sorgo**, 22., 1998, Recife. Anais... Recife: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, p.210-217. 1998.

Lima, A. G. B. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de bananas**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil. 244 p. 1999.

Lima, A. G. B.; Nebra, S. A. Theoretical analysis of the diffusion process inside prolate spheroidal solids. **Drying Technology**, v. 18, n. 2, p. 21-48. 2000a.

Lima, A. G. B.; Nebra, S. A. Simultaneous moisture transport and shrinkage during drying of solids with ellipsoidal configuration. **Proceedings of the International Drying Symposium (IDSi2000)**, Noordwijkerhout, Holanda, vol. 1, CD-ROM, 2000b.

Lima, A. G. B., Queiroz, M. R.; Nebra, S. A. Simultaneous moisture transport and shrinkage during drying of solids with ellipsoidal configuration, **Chemical Engineering Journal**, To be published. 2002.

Lisboa, J. A. P.; Scotegana, G. A.; D. N. **Milho. Revista Genótipo**, v.2, n. 3, p. 32-35, 1999.

Liu, J. Y.; Simpson, W. T. Mathematical relationship between surface emission and diffusion coefficients. **Drying Technology**, v. 14, n. 3 e 4, p. 677-699, 1996.

Liu, J. Y.; Simpson, W. T. Inverse determination of diffusion coefficient for moisture diffusion in Wood. Proceedings of 33RD ASME National Heat Transfer Conference: **Heat and Mass Transfer in Porous Media**, August 15-17, Albuquerque, New Mexico, 1999.

Liu, J. Y.; Simpson, W. T.; Verrill, S. P. An inverse moisture diffusion algorithm for the determination of diffusion coefficient. **Drying Technology**, v. 19, n. 8, p. 1555-1568, 2001.

Luikov, A. V. **Analytical heat diffusion theory**. Academic Press, New York and London, 684 p. 1968.

Luikov, A. V. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary porous bodies: review. **International Journal heat and mass transfer**, v.18, n. 4, p. 1-14, 1975.

Maliska, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. LTC Editora S.A., Rio de Janeiro, 453 p. 2004.

Martinazzo, A. P.; Corrêa, P. C.; Resende, O.; Melo, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 11, n. 5, p. 301-306. 2007.

Melendez, J.; Grenovero, S.; Capellacci, H. Anticipated maize harvest in entre rios province. **In: Congresso Argentino de ingiería rural, 2, 1992, Villa Maria, Argentina.** Resumo... Villa Maria, AR: Universidad Tecnologica Nacional; Unidad Academica Villa Maria, p.101. 1992.

Mercali, G. D.; Tessaro, I. C.; Norena, C. P. Z.; Marczak, L. D. F. Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of bananas (*Musa sapientum*, shum). **International Journal of Food Science and Technology**, v. 45, n. 11, p. 2281-2289, 2010.

Milman, M. J. **Equipamentos para pré-processamento de grãos.** Pelotas: Ed. Universitário/UFPel, 2002. 206 p.

Minkowycz, W. J.; Sparrow, E. M.; Schneider, G. E.; Pletcher, R. H. **Handbook of numerical heat transfer.** New York: John Wiley & Sons, Inc., 1204p. 1988.

Miranda, L.C.; da Silva, W.R.; Cavariani, C. Secagem de sementes de soja em silo com distribuição radial do fluxo de ar. I. Monitoramento físico. **Pesq agropec bras, Brasília**, v.34, n.11, p.2097-2108, 1999.

Mohsenin, N. N. **Thermal properties of foods and agricultural materials.** New York: Gordon, 407 p. 1980.

Mohsenin, N. N. **Physical properties of plant and animal materials.** New York: Gordon and Breach Publishers, 841p. 1986.

Mundada, M.; Hathan, B. S.; Maske, S. Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of pomegranate arils. **Journal of Food Science**, v.76, n.1, p. 31-39, 2011.

Nascimento, J. J. S. **Fenômenos de difusão transiente em sólidos paralelepípedos. Estudo de caso: secagem de materiais cerâmicos.** Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, UFPB, João Pessoa, PB, Brasil. 181 p. 2002.

Nascimento, J. J. S.; Mederos, B. J. T.; Belo, F. A.; Lima, A. G. B. Transporte de materia con reducción de volumen en el interior de sólidos paralelepípedos. **Información Tecnológica**, v. 16, n. 1, p. 35-41, 2005.

Nascimento, J. J. S.; Lima, A. G. B.; Teruel, B. J.; Belo, F. A. Heat and mass transfer with shrinkage during the drying of ceramic bricks. **Información Tecnológica**, v. 17, n. 6, p. 145-151, 2006.

National Research Council (Board on Science and Technology for International Development), Quality-protein maize. **National Academy**, Washington, D.C. 100 p. 1988.

Nunes, F. C. F. de P. **Relações entre irregularidades pluviométricas, desenvolvimento fenológico e produtividade do milho (Zea mays L.) e probabilidade de frustração de safra**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências e Tecnologia, UFCE, Fortaleza, CE, Brasil, 174p. 1993.

OECD/Food and Agriculture Organization of the United Nations (2015), **OECD-FAO Agricultural Outlook 2015**, OECD Publishing, Paris. [http://dx.doi.org/10.1787/agr\\_outlook-2015-en](http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2015-en). Acesso em: 11 junho de 2016.

Olek, W.; Perré, P.; Weres J. **Inverse analysis of the transient bound water diffusion in wood**. *Holzforschung*, v. 59, n. 1, p. 38-45. 2005.

Olek, W.; Weres, J. **Effects of the method of identification of the diffusion coefficient on accuracy of modeling bound water transfer in wood**. *Transport in Porous Media*, v. 66, n. 2, p. 135-144. 2007.

Oliveira, V. A. B. **Transferência de Calor e Massa no Interior de Sólidos com Forma Esferoidal Prolata via Termodinâmica dos Processos Irreversíveis**. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil. 132 p. 2006.

Oliveira, D.E.C.; Resende, O; Smaniotto, T.A.S.; Campos, R.C.; Chaves, T.H. Modelagem Matemática da Secagem dos Grãos de Milho Cultivar AG 7088. **In: Congresso de Pesquisa e Pós-Graduação**, I, 2012, Rio Verde, GO. Anais...Rio Verde: Campus Rio Verde do IFGoiano, 2012.

Ohara, A. P.; Spogis, N. and Nunhez, J. R. Development of a 3D software for the drying of food using a computational fluid dynamic (cfd) approach. **Drying 2004 Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004) São Paulo, Brazil**, v. 7, n. 3, p. 374-380. 2004.

Özişik, M. N. **Transferência de calor: um texto básico**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A., 661 p. 1990.

Palhares, M. **Distribuição e população de plantas e produtividade de grãos de milho**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências e Tecnologia, USP, Piracicaba, SP, Brasil. 90p. 2003.

Palacin, J.J.F.; Filho, A.F.L.; Cecon, P.R.; Montes, E.J.M. Determinação das curvas de secagem de milho nas espigas (*Zea mays* L.). **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.13, n.4, p.300-313, 2005.

Patankar, S. V., **Numerical heat transfer and fluid flow**, New York, Hemisphere Publishing Corporation, 197p. 1980.

Paterniani, E.; Nass, L.L.; Santos, M.X. O valor dos recursos genéticos de milho para o Brasil: uma abordagem histórica da utilização do germoplasma. In: **UDRY, C.W.; Duarte, W. Uma história brasileira do milho: o valor dos recursos genéticos**. Brasília: Paralelo 15, v. 3, n. 5, p. 11-41. 2000.

Pessoa, T.; Galdino, P. O.; Gurjão, G. C.; Gurjão, F. F.; Cavalcanti Mata, M. E. R. M. Secagem convectiva de grãos de sorgo em camada fina por secador de leito fixo. **Revista Verde**, v. 6, n. 1, p. 247-255, 2011.

Pinazza, L. A.; Perspectiva da cultura do milho e do sorgo no Brasil, In: **Cultura do milho no Brasil: Fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Potafos, v. 3, n. 2, p.01-10. 1993.

Pinheiro, P. C. C.; Raad, T. J.; Yoshida, M. I. Model of a process for drying *Eucalyptus* spp at high temperatures. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. v. 15, n. 4, p. 382-395, 1998.



Pirozzi, D. C. Z.; Amendola, M. **Resfriamento rápido com ar forçado de morangos: um estado numérico usando método das diferenças finitas explícitas.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 31, 2002, Salvador. Anais. Salvador: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2002, 1 CD ROM.

Prakotmak, P.; Soponronnarit, S.; Prachayawarakorn, S. Modelling of moisture diffusion in pores of banana foam mat using a 2-D stochastic pore network: Determination of moisture diffusion coefficient during absorption process. **Journal of Food Engineering**, v. 96, n. 5, p. 119-126, 2010.

Press, W. H.; Teukolsky, S. A.; Vetterling, W. T.; Flannery, B. P. **Numerical recipes in Fortran 77. The art of scientific computing.** New York: Cambridge University Press, v. 1, n. 1, 933p. 1996.

Póvoas, Y. V.; Jonh, V. M.; Cincotto, M. A. Influência da perda água por evaporação na resistência de aderência entre argamassa colante e placa cerâmica. **Ambiente Construído**, v. 2, n. 2, p. 7-18, 2002.

Puzzi, D. **Abastecimento e armazenagem de grãos.** Campinas, Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, v. 3, n. 2, p. 399-405. 1986.

Queiroz, M.R. **Estudo teórico-experimental da cinética de secagem de bananas.** Ph.D. Thesis, Universidade Estadual de Campinas, 182 p. 1994.

Rafiee, S.; Keyhani, A.; Mohammadi, A. Soybean seeds mass transfer simulation during drying using finit element method. **World Applied Sciences Journal**, v. 4 n. 2, p. 284-288, 2008.

Rastogi N.K.; Raghavarao K.S.M.S. **Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration.** Lebensm.-Wiss. u.-Technol, v 37, n. 3, p. 43–47, 2004.

Raupp, D.S.; Moreira, S.S.; Banzatto, D.A. Aproveitamento de resíduo resultante de indústrias alimentícias como fonte de nutrientes para humanos e animais: aproveitamento de resíduo resultante da industrialização da maçã. **(Relatório de Projeto de Pesquisa Institucional).** Ponta Grossa: Universidade Estadual, 1999.

Resende, O.; Corrêa, P.C.; Goneli, A.L.D.; Botelho, F.M.; Rodrigues, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.10, n.1, p.17-26, 2008.

Ricardez, A. P.; Suárez, J. R.; Berumen, L. A. The drying of red oak at vacuum pressure. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, v. 7, n. 1, p. 23-26, 2005.

Roberts, J. S.; Kidd, D. R.; Padilha-Zakour. O. Drying kinetics of grape seeds. **Journal of Food Engineering**, v.89, n. 4, p. 460-465, 2008.

Rostagno, H. S.; **Tabelas brasileiras para aves e suínos: composição de alimentos e exigências nutricionais**. 2 ed. Viçosa: UFV, Departamento de Zootecnia, 2005. 186 p

Ruiz-López, I.I.; Castillo-Zamudio, R. I.; Salgado-Cervantes, M. A.; Rodríguez-Jimenes, G. C.; García-Alvarado, M. A. **Mass transfer modeling during osmotic dehydration of hexahedral pineapple slices in limited volume solutions**. *Food Bioprocess Technol*, v.3, n. 2, p. 427–433, 2010.

Seerley, R.W. **Major feedstuffs used in swine diets**. In: Miller, E.R., Ullrey, D.E., Lewis, A.J. (Eds.) *Swine nutrition*. London, Butterworth-Heinemann. p.451-81. 1991.

Shih, T. **Numerical heat transfer**. Washigton: Hemisphere Publishing Corporation, 536p. 1984.

Shotwell, M. A.; Larkins, B. A. The biochemistry and molecular biology of seed storage proteins. **The Biochemistry of Plants: a Comprehensive Treatise**, v.15, n. 5, p.297-345, 1989.

Silva, A. A. L. Desenvolvimento de um índice para avaliação de danos mecânicos em grãos de milho. **Engenharia na Agricultura, Viçosa**, v.5, n.3, p.244-253, 1997.

Silva, C. M. D. P. S. **Difusão de massa em corpos cilíndricos: modelagem e desenvolvimento de software com aplicação à secagem de bananas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, Centro de Ciências e Tecnologia, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil. 129 p. 2010.

Silva, C. M. D. P. S. **Ferramentas analíticas e numéricas para a descrição da secagem de sólidos na forma de cilindros e de elipsoides.** Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Centro de Ciências e Tecnologia, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil, 254 p. 2012.

Silva, E. F. M. **Modelos empíricos e difusivos para a descrição da secagem de bananas.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. UFCG, Campina Grande, PB, Brasil. 117 p. 2013.

Silva, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas.** Viçosa: Aprenda Fácil, 2000. 502p.

Silva, L. C. **Armazenamento de Grãos.** Empresas Estrangeiras. Universidade do Oeste Paranaense. Cascavel, 2003. Disponível em: Acesso em: 18 ago. 2014.

Silva, L. C. da. Secagem de grãos. **Boletim Técnico: AG: 04/05.** Departamento de Engenharia Rural, UFES. 2005.

Silva, L. D. **Técnicas analíticas e numéricas para a secagem de sólidos na forma de paralelepípedo: uma abordagem tridimensional.** 182 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil, 2012.

Silva, M. M. **Modelagem e simulação da transferência de calor em alimentos com forma paralelepipedal. Estudo de caso: resfriamento e congelamento de batatas.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, Centro de Ciências e Tecnologia, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil, 64 p. 2005.

Silva, W. P. **Transporte difusivo em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas.** Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Centro de Ciências e Tecnologia, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil, 263 p. 2007.

Silva, W. P.; Mata, M. E. R. M. C.; Silva, C. D. P. da S. e; Guedes, M. A.; Lima, A. G. B. de; Determinação da difusividade e da energia de ativação para feijão macassar (*vigna unguiculata* (l.) walp.), variedade sempre-verde, com base no 77 comportamento da secagem. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.28, n.2, p.325-333, 2008.

Silva, W. P.; Precker, J.W.; Silva, C. M. D. P. S.; Silva, D. D. P. S. Determination of the effective diffusivity via minimization of the objective function by scanning: application to drying of cowpea. **Journal of Food Engineering**, v. 95 n. 2, p. 298-304, 2009a.

Silva, W.P.; Precker, J. W.; Silva, D. D. P. S.; Silva, C. D. P. S.; Lima, A. G. B. Numerical simulation of diffusive processes in solids of revolution via the finite volume method and generalized coordinates, **Int. J. of Heat and Mass Transf.** v. 52, n. 22, p. 4976–4985. 2009b.

Silva, W. P.; Precker, J. W.; Silva, C. M. D. P. S.; Gomes, J.P. Determination of effective diffusivity and convective mass transfer coefficient for cylindrical solids via analytical solution and inverse method: Application to the drying of rough rice. **Journal of Food Engineering**, v. 98, n. 3, p. 302-308, 2010.

Silva, W. P.; Silva, C. M. D. P. S.; Precker, J. W.; Gomes, J. P.; Nascimento, P. L., Da Silva, L. D. **Diffusion models for the description of seedless grape drying using analytical and numerical solutions.** Agricultural Sciences, v.3, n.4, p. 545-556, 2012.

Silva, W. P.; Da Silva, L. D.; Farias, V. S. O; Silva, C. M. D. P. S. **Description of drying ceramic plates by a diffusion model.** Ceramics International, v. 59, n.3, p. 409 - 416, 2013a.

Silva, W. P.; Da Silva, L. D.; Farias, V. S. O; Silva, C. M. D. P. S. **Water migration in clay slabs during drying: a three-dimensional numerical approach.** Ceramics International, v. 39, n.1, p. 4017 - 4030, 2013b.

Silva, W. P.; Silva, C. M. D. P. S.; Silva Junior, A. F.; Queiroz, A. J. M. A numerical approach to determine some properties of cylindrical pieces of bananas during drying. **Journal of Food Engineering**, v. 11, n. 3, p. 335-347, 2015.

Silva, W. P.; Silva, C. M. D. P. S. **“Prescribed” software**, 2009a. Disponível em <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Prescribed.htm> , acessado em julho de 2015.

Silva, W. P.; Silva, C. M. D. P. S. **“Convective” software**, 2009b. Disponível em: <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Convective.htm> , acessado em julho de 2015.

Silva, W. P., **“Contour plots” software**, 2010. Disponível em:<http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Contour.zip>, acessado em agosto de 2016.

Silva, W. P. e Silva, C. M. D. P. S. **Labfit curve fitting software**, V.7.2.48 (2011); online, disponível em: [www.labfit.net](http://www.labfit.net), data de acesso: janeiro/2014).

Silva, W. P.; Silva, C. M. D. P. S., **LS Optimizer**, Version 2.1 (2016), online, available from world wide web: <<http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/LS.htm>>, data do acesso: março/2016.

Sodha, M. S.; Bansal, N. K.; Kumar, A.; Bansal, P.K.; Malik, M. A. S. **Solar crop drying**. Boca Raton, CRC Press, v. 1, n. 2, 141p. 1987.

Srivastava, V. K.; John, J. **Deep bed grain drying modeling. Energy Conversion and Management**, v. 43, n. 13, p. 1689-1708, 2002.

Tello-Panduro, B.; García-Vásquez Y.; Medinavivanco, M.; Mendieta-Taboada, O. Air drying of clams (*Anodontites trapesialis*) and tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillet. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM (IDS 2004), 14., 2004, São Paulo. **Proceedings...** CD-ROM.

Thompson, R. A.; Foster, G. H. Stress cracks and breakage in artificially dried corn. Washington, D.C.: USDA, **Marketing Research Report**, No. 63118p. 1963.

Thuwapanichayanan, R.; Prachayawarakorn, S.; Kunwisawa, J.; Soponronnarit, S. Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying, **Food Science and Technology**, v.44, n.1, p. 1502-1510, 2011.

Tunde-Akintunde, T. Y.; Ogunlakin, G. O. Mathematical modeling of drying of pretreated and untreated pumpkin. **Journal of Food Science and Technology**, v. 50, n. 4, p. 705-713, 2011.

Turhan, M.; Sayar, S.; Gunasekaran, S. Application of Peleg model to study water absorption in chickpea during soaking. **Journal of Food Engineering**, v. 53, n. 2, p.153-159, 2002.

USDA – United States Department of Agriculture. **World Agricultural Production**. Washington, DC: USDA – Agency Reports, 2016. Disponível em: [http://www.usda.gov/wps/portal/usda/usdahome?navid=AGENCY\\_REPORTS](http://www.usda.gov/wps/portal/usda/usdahome?navid=AGENCY_REPORTS). Acessado em: 15 junho 2016.

Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Bilbao-Sáinz, C., Uribe, E., Lemus-Mondaca, R. Empirical Modeling of drying process for apple (CV Granny Smith) slices at different air temperatures. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.32, n. 7, p. 972-986, 2008.

Vilela, C. A. A.; Artur, P. O. Secagem do açafrão (*Curcuma longa* L.) em diferentes cortes geométricos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.28, n. 7, p.387-394, 2008.

Villela, F. A. **Efeitos da secagem intermitente sobre a qualidade de sementes de milho**. Tese de Doutorado. Piracicaba: USP-ESALQ, 104p. 1991.

Villela, F. A ; Silva, W.R. Curvas de secagem de sementes de milho utilizando o método intermitente. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.49, n.1, p.145-153,1992.

Villela, F. A ; Peske, S.T. Tecnologia pós-colheita para arroz. In: PESKE, S.T.; NEDEL, J.L.; BARROS, A.C.S.A. **Produção de arroz irrigado**. Pelotas : UFPel, p. 351- 412. 1997.

Villar, C. G. **Estudo do desempenho de um secador convectivo de bandejas para a secagem de bananas: análise da influência das variáveis operacionais**. (Dissertação Mestrado). Campina Grande: UFPB, 75p. 1999.

Virieux, J. P-SV wave propagation in heterogeneous media, velocity-stress finite difference method. **Geophysics**, v. **51**, p. 889-901, 1986.

Watson, JD. and Berry A. **DNA: o segredo da vida**. Tradução de Malferrari CA. São Paulo. Companhia das letras. 470p. 2005.

Wu, B.; Yang, W.; Jia, C. **A three-dimensional numerical simulation of transient heat and mass transfer inside a single rice kernel during the drying process**. Biosystems Engineering, v. 87, n. 2, p. 191-299, 2004.

Zabalaga, R. F.; Carballo, S. C. Convective drying and water Adsorption behavior of unripe banana: Mathematical modeling. **Journal of food processing and preservation**, v. 39, n. 6, p. 1334-1341, 2015.

Zarillo, S.; Pearsall, D. M.; Raymond, J. S.; Tisdale, M. A.; Quon, D. J. **Directly dated starch residues document early formative maize (*Zea mays* L.) in tropical Ecuador.** Disponível em: [http:// www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas). PNAS, v. 105, p. 5006-5011. 2008.

## APÊNDICE A – RESULTADOS DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Neste apêndice são apresentados, sob a forma de tabelas, os resultados obtidos na parte experimental deste trabalho. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Engenharia de Alimentos (LEA) da Unidade Acadêmica de Engenharia de Alimentos do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN), Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, no mês de julho de 2015. Também são apresentadas tabelas com resultados calculados através dos dados experimentais para obter valores característicos do produto em estudo, utilizando os estudos teóricos, para viabilizar a obtenção dos resultados desejados.

### A.1. Condições sob as quais foram realizados a secagem dos grãos de milho

A Tabela A.1 apresenta as condições sob as quais foram realizados os processos de secagem de grãos de milho com ar quente para as temperaturas do ar de secagem que foram estabelecidos no experimento.

Tabela A.1 - Informações sobre as condições do ar de secagem e do ar ambiente

Temperatura (°C)	Ar de secagem		Ar ambiente		Data da realização dos experimentos
	$\overline{UR}(\%)$	$\overline{v}(m.s^{-1})$	$\overline{T}_a(^{\circ}C)$	$\overline{UR}(\%)$	
45,0	24,3	1,05	28	64,4	07/07/2015
55,0	17,6	1,02	25	67,1	09/07/2015
65,0	8,1	1,08	27	65,6	14/07/2015
75,0	5,1	0,98	29	61,8	16/07/2015



## A.2. Dimensões, teor de umidade e tempo de secagem

A Tabela A.2 apresenta os valores das dimensões iniciais das amostras, teor de umidade inicial, final e de equilíbrio além do valor da massa seca e do tempo até atingir o teor de umidade final para cada uma das temperaturas do ar de secagem que foram estabelecidos na pesquisa.

Tabela A.2 - Dimensões, teor de umidade, massa seca e tempo de secagem dos grãos de milho para cada temperatura do ar de secagem.

T (°C)	C (mm)	L (mm)	E (mm)	M <sub>i</sub> (bs)	M <sub>eq</sub> (bs)	m <sub>s</sub> (g)	t (min)
45,0	10,82	8,78	3,46	0,939	0,074	18,062	1400
55,0	12,05	9,98	3,48	1,178	0,095	14,838	1220
65,0	11,41	9,01	3,60	0,984	0,045	18,233	1160
75,0	10,01	8,87	3,29	1,072	0,008	16,934	0680

### A.3. Dados experimentais da cinética de secagem dos grãos de milho

As Tabelas de A.3.1 a A.3.4 apresentam os dados experimentais da cinética de secagem em função do tempo de secagem dos grãos de milho da variedade 1051 com as condições do ar de secagem e do ar ambiente indicados na Tabela A.1.

Tabela A.3.1 – Teor de umidade em função do tempo com ar de secagem a 45°C.

Tempo (min)	Massa (g)	Massa de água (g)	Matéria seca (g)	M <sub>bu</sub> (%)	M <sub>bs</sub>	$\overline{M}^*$
0	35.020	16.958	18.062	48.423	0.939	1.000
5	34.510	16.448	18.062	47.660	0.911	0.967
10	34.180	16.118	18.062	47.155	0.892	0.946
15	33.820	15.758	18.062	46.593	0.872	0.923
20	33.540	15.478	18.062	46.147	0.857	0.905
30	32.880	14.818	18.062	45.066	0.820	0.863
40	32.210	14.148	18.062	43.923	0.783	0.820
50	31.500	13.438	18.062	42.659	0.744	0.775
70	30.440	12.378	18.062	40.662	0.685	0.707
90	29.390	11.328	18.062	38.542	0.627	0.640
110	28.470	10.408	18.062	36.556	0.576	0.581
140	27.210	9.148	18.062	33.619	0.506	0.500
170	25.920	7.858	18.062	30.315	0.435	0.418
200	25.190	7.128	18.062	28.295	0.395	0.371
260	23.630	5.568	18.062	23.562	0.308	0.271
320	22.450	4.388	18.062	19.544	0.243	0.196
380	21.420	3.358	18.062	15.675	0.186	0.130
440	20.920	2.858	18.062	13.660	0.158	0.098
500	20.470	2.408	18.062	11.762	0.133	0.069
560	20.180	2.118	18.062	10.494	0.117	0.051
620	20.010	1.948	18.062	9.733	0.108	0.040
680	19.930	1.868	18.062	9.371	0.103	0.035
740	19.790	1.728	18.062	8.730	0.096	0.026
800	19.680	1.618	18.062	8.220	0.090	0.019
860	19.620	1.558	18.062	7.939	0.086	0.015
920	19.580	1.518	18.062	7.751	0.084	0.012
980	19.530	1.468	18.062	7.515	0.081	0.009
1040	19.510	1.448	18.062	7.420	0.080	0.008
1100	19.480	1.418	18.062	7.277	0.078	0.006
1160	19.450	1.388	18.062	7.134	0.077	0.004
1220	19.430	1.368	18.062	7.039	0.076	0.003
1280	19.420	1.358	18.062	6.991	0.075	0.002
1440	19.400	1.338	18.062	6.895	0.074	0.001

Tabela A.3.2 – Teor de umidade em função do tempo com ar de secagem a 55°C.

Tempo (min)	Massa (g)	Massa de água (g)	Matéria seca (g)	M <sub>bu</sub> (%)	M <sub>bs</sub>	$\bar{M}^*$
0	36.690	19.841	16.849	54.077	1.178	1.000
5	36.040	19.191	16.849	53.249	1.139	0.965
10	35.630	18.781	16.849	52.711	1.115	0.943
15	35.040	18.191	16.849	51.915	1.080	0.912
20	34.550	17.701	16.849	51.233	1.051	0.886
30	33.860	17.011	16.849	50.239	1.010	0.849
40	33.060	16.211	16.849	49.035	0.962	0.806
50	32.290	15.441	16.849	47.820	0.916	0.765
70	30.890	14.041	16.849	45.455	0.833	0.690
90	29.530	12.681	16.849	42.943	0.753	0.617
110	28.330	11.481	16.849	40.526	0.681	0.553
140	26.490	9.641	16.849	36.395	0.572	0.455
170	25.300	8.451	16.849	33.403	0.502	0.391
200	23.990	7.141	16.849	29.766	0.424	0.321
260	22.210	5.361	16.849	24.137	0.318	0.226
320	21.120	4.271	16.849	20.222	0.253	0.167
380	20.030	3.181	16.849	15.881	0.189	0.109
440	19.420	2.571	16.849	13.239	0.153	0.076
500	19.050	2.201	16.849	11.553	0.131	0.057
560	18.780	1.931	16.849	10.282	0.115	0.042
620	18.610	1.761	16.849	9.462	0.105	0.033
680	18.500	1.651	16.849	8.924	0.098	0.027
740	18.370	1.521	16.849	8.279	0.090	0.020
800	18.320	1.471	16.849	8.029	0.087	0.018
860	18.320	1.471	16.849	8.029	0.087	0.018
920	18.320	1.471	16.849	8.029	0.087	0.018
980	18.180	1.331	16.849	7.321	0.079	0.010
1040	18.180	1.331	16.849	7.321	0.079	0.010
1100	18.150	1.301	16.849	7.168	0.077	0.009
1160	18.110	1.261	16.849	6.963	0.075	0.006
1440	17.990	1.141	16.849	6.342	0.068	0.000

Tabela A.3.3 – Teor de umidade em função do tempo com ar de secagem a 65°C.

Tempo (min)	Massa (g)	Massa de água (g)	Matéria seca (g)	M <sub>bu</sub> (%)	M <sub>bs</sub>	$\bar{M}^*$
0	36.180	17.947	18.233	49.605	0.984	1.000
5	35.590	17.357	18.233	48.769	0.952	0.966
10	34.620	16.387	18.233	47.334	0.899	0.909
15	34.050	15.817	18.233	46.452	0.867	0.876
20	33.290	15.057	18.233	45.230	0.826	0.831
30	32.430	14.197	18.233	43.777	0.779	0.781
40	31.290	13.057	18.233	41.729	0.716	0.715
50	29.960	11.727	18.233	39.142	0.643	0.637
70	27.610	9.377	18.233	33.962	0.514	0.500
90	25.670	7.437	18.233	28.972	0.408	0.386
110	24.110	5.877	18.233	24.376	0.322	0.295
140	22.450	4.217	18.233	18.784	0.231	0.198
170	21.310	3.077	18.233	14.439	0.169	0.132
200	20.670	2.437	18.233	11.790	0.134	0.095
260	20.050	1.817	18.233	9.062	0.100	0.058
320	19.790	1.557	18.233	7.868	0.085	0.043
380	19.620	1.387	18.233	7.069	0.076	0.033
440	19.510	1.277	18.233	6.545	0.070	0.027
500	19.430	1.197	18.233	6.161	0.066	0.022
560	19.340	1.107	18.233	5.724	0.061	0.017
620	19.290	1.057	18.233	5.480	0.058	0.014
680	19.260	1.027	18.233	5.332	0.056	0.012
740	19.200	0.967	18.233	5.037	0.053	0.009
800	19.170	0.937	18.233	4.888	0.051	0.007
860	19.140	0.907	18.233	4.739	0.050	0.005
920	19.120	0.887	18.233	4.639	0.049	0.004
980	19.100	0.867	18.233	4.539	0.048	0.003
1040	19.100	0.867	18.233	4.539	0.048	0.003
1100	19.090	0.857	18.233	4.489	0.047	0.002
1160	19.060	0.827	18.233	4.339	0.045	0.001
1220	19.050	0.817	18.233	4.289	0.045	0.000
1440	19.050	0.817	18.233	4.289	0.045	0.000

Tabela A.3.4 – Teor de umidade em função do tempo com ar de secagem a 75°C.

Tempo (min)	Massa (g)	Massa de água (g)	Matéria seca (g)	M <sub>bu</sub> (%)	M <sub>bs</sub>	$\overline{M}^*$
0	35.090	18.156	16.934	51.741	1.072	1.000
5	33.660	16.726	16.934	49.691	0.988	0.921
10	32.470	15.536	16.934	47.847	0.917	0.855
15	31.200	14.266	16.934	45.724	0.842	0.784
20	30.480	13.546	16.934	44.442	0.800	0.744
30	28.440	11.506	16.934	40.457	0.679	0.631
40	26.550	9.616	16.934	36.218	0.568	0.526
50	25.160	8.226	16.934	32.695	0.486	0.449
70	21.310	4.376	16.934	20.535	0.258	0.235
90	19.240	2.306	16.934	11.985	0.136	0.120
110	18.650	1.716	16.934	9.201	0.101	0.088
140	18.080	1.146	16.934	6.338	0.068	0.056
170	17.850	0.916	16.934	5.131	0.054	0.043
200	17.740	0.806	16.934	4.543	0.048	0.037
260	17.590	0.656	16.934	3.729	0.039	0.029
320	17.520	0.586	16.934	3.345	0.035	0.025
380	17.430	0.496	16.934	2.845	0.029	0.020
440	17.360	0.426	16.934	2.454	0.025	0.016
500	17.350	0.416	16.934	2.397	0.025	0.016
560	17.180	0.246	16.934	1.432	0.015	0.006
620	17.120	0.186	16.934	1.086	0.011	0.003
680	17.070	0.136	16.934	0.796	0.008	0.000
740	17.070	0.136	16.934	0.796	0.008	0.000
800	17.070	0.136	16.934	0.796	0.008	0.000
860	17.070	0.136	16.934	0.796	0.008	0.000
920	17.070	0.136	16.934	0.796	0.008	0.000
980	17.070	0.136	16.934	0.796	0.008	0.000
1040	17.070	0.136	16.934	0.796	0.008	0.000
1100	17.070	0.136	16.934	0.796	0.008	0.000
1160	17.070	0.136	16.934	0.796	0.008	0.000
1220	17.070	0.136	16.934	0.796	0.008	0.000
1440	17.070	0.136	16.934	0.796	0.008	0.000

#### A.4. Taxa da variação de massa em função do tempo

As Tabelas de A.4.1 a A.4.4 apresentam a taxa de variação da massa em função do tempo de secagem dos grãos de milho da variedade 1051 com as condições do ar de secagem e do ar ambiente indicados na Tabela A.1.

Tabela A.4.1 – Taxa de variação de massa em função do tempo com ar de secagem a 45°C

t(min.)	dm/dt (g/min)	t(min.)	dm/dt (g/min)	t(min.)	dm/dt (g/min)
0	0,0000	90	-0,0117	500	-0,0009
5	-0,1020	110	-0,0084	560	-0,0005
10	-0,0330	140	-0,0090	620	-0,0003
15	-0,0240	170	-0,0076	680	-0,0001
20	-0,0140	200	-0,0036	740	-0,0002
30	-0,0220	260	-0,0060	800	-0,0001
40	-0,0167	320	-0,0037	860	-0,0001
50	-0,0142	380	-0,0027		
70	-0,0151	440	-0,0011	920	0,000

Tabela A.4.2 – Taxa de variação de massa em função do tempo com ar de secagem a 55°C

t(min.)	dm/dt (g/min)	t(min.)	dm/dt (g/min)	t(min.)	dm/dt (g/min)
0	0,0000	90	-0,0151	500	-0,0007
5	-0,1300	110	-0,0109	560	-0,0005
10	-0,0410	140	-0,0131	620	-0,0003
15	-0,0393	170	-0,0070	680	-0,0002
20	-0,0245	200	-0,0065	740	-0,0002
30	-0,0230	260	-0,0068	800	-0,0001
40	-0,0200	320	-0,0034	860	0,0000
50	-0,0154	380	-0,0029		
70	-0,0200	440	-0,0014	920	0,000

Tabela A.4.3 – Taxa de variação de massa em função do tempo com ar de secagem a 65°C

t(min.)	dm/dt (g/min)	t(min.)	dm/dt (g/min)	t(min.)	dm/dt (g/min)
0	0,0000	70	-0,0336	380	-0,0004
5	-0,1180	90	-0,0216	440	-0,0002
10	-0,0970	110	-0,0142	500	-0,0002
15	-0,0380	140	-0,0119	560	-0,0002
20	-0,0380	170	-0,0067	620	-0,0001
30	-0,0287	200	-0,0032	680	0,0000
40	-0,0285	260	-0,0024	740	-0,0001
50	-0,0266	320	-0,0008	800	0,0000

Tabela A.4.4 – Taxa de variação de massa em função do tempo com ar de secagem a 75°C

t(min.)	dm/dt (g/min)	t(min.)	dm/dt (g/min)	t(min.)	dm/dt (g/min)
0	0,0000	70	-0,0550	380	-0,0002
5	-0,2860	90	-0,0230	440	-0,0002
10	-0,1190	110	-0,0054	500	0,0000
15	-0,0847	140	-0,0041	560	-0,0003
20	-0,0360	170	-0,0014	620	-0,0001
30	-0,0680	200	-0,0005	680	-0,0001
40	-0,0473	260	-0,0006		
50	-0,0278	320	-0,0002	740	0,0000

### A.5. Evolução das dimensões em função do tempo

As Tabelas de A.5.1 a A.5.4 apresentam a evolução das dimensões durante a secagem das amostras dos grãos do milho da variedade 1051 para todas as temperaturas estudadas com as condições do ar de secagem e do ar ambiente indicados na Tabela A.1.

Tabela A.5.1 – Evolução das dimensões da média das amostras dos grãos de milho da variedade 1051 durante a secagem a 45°C.

Tempo (min)	$L_x$ (mm)	$L_y$ (mm)	$L_z$ (mm)	$L_x^*$	$L_y^*$	$L_z^*$
0	3,46000	8,78333	10,82333	1,00000	1,00000	1,00000
10	3,31667	8,73333	10,77667	0,95857	0,99431	0,99569
20	3,21333	8,70000	10,68333	0,92871	0,99051	0,98706
30	3,18000	8,64667	10,62000	0,91908	0,98444	0,98121
40	3,14667	8,53000	10,50667	0,90944	0,97116	0,97074
50	3,11000	8,45667	10,38333	0,89884	0,96281	0,95935
70	3,09333	8,40000	10,31000	0,89403	0,95636	0,95257
90	3,02000	8,10333	10,13000	0,87283	0,92258	0,93594
120	2,98000	8,05000	9,98333	0,86127	0,91651	0,92239
150	2,93667	7,89333	9,89333	0,84875	0,89867	0,91407
180	2,91667	7,80667	9,86000	0,84297	0,88880	0,91099
210	2,90333	7,76333	9,80000	0,83911	0,88387	0,90545
270	2,90333	7,73000	9,77667	0,83911	0,88008	0,90330
330	2,89000	7,70333	9,76333	0,83526	0,87704	0,90206
390	2,89000	7,67667	9,76000	0,83526	0,87400	0,90176
450	2,88333	7,67333	9,74667	0,83333	0,87362	0,90052
510	2,85667	7,64000	9,74000	0,82563	0,86983	0,89991
570	2,84000	7,59000	9,71000	0,82081	0,86414	0,89714
630	2,84333	7,57667	9,70000	0,82177	0,86262	0,89621
690	2,84333	7,54333	9,69000	0,82177	0,85882	0,89529
750	2,83667	7,50667	9,66333	0,81985	0,85465	0,89282
810	2,83333	7,50333	9,66667	0,81888	0,85427	0,89313
870	2,84333	7,49667	9,66000	0,82177	0,85351	0,89252
930	2,83667	7,48667	9,65000	0,81985	0,85237	0,89159
990	2,84333	7,48000	9,65333	0,82177	0,85161	0,89190
1050	2,84000	7,49000	9,65333	0,82081	0,85275	0,89190
1110	2,83667	7,47333	9,64667	0,81985	0,85085	0,89128
1170	2,83333	7,48000	9,64667	0,81888	0,85161	0,89128
1230	2,83000	7,47667	9,65667	0,81792	0,85123	0,89221
1290	2,83000	7,46667	9,64333	0,81792	0,85009	0,89098
1350	2,83000	7,45667	9,64667	0,81792	0,84896	0,89128
1410	2,82667	7,44000	9,64000	0,81696	0,84706	0,89067



Tabela A.5.2 – Evolução das dimensões da média das amostras dos grãos de milho da variedade 1051 durante a secagem a 55°C.

Tempo (min)	$L_x$ (mm)	$L_y$ (mm)	$L_z$ (mm)	$L_x^*$	$L_y^*$	$L_z^*$
0	3,48000	9,97667	12,05333	1,00000	1,00000	1,00000
10	3,32333	9,72333	11,48667	0,95498	0,97461	0,95299
20	3,29333	9,40333	11,21000	0,94636	0,94253	0,93003
30	3,32667	9,59333	11,13000	0,95594	0,96158	0,92340
40	3,31333	9,54667	11,12333	0,95211	0,95690	0,92284
50	3,09667	9,47333	10,68000	0,88985	0,94955	0,88606
70	3,18000	9,36333	10,61333	0,91379	0,93852	0,88053
90	3,17333	9,28333	10,44333	0,91188	0,93050	0,86643
120	3,14667	9,17000	10,12000	0,90421	0,91914	0,83960
150	3,14000	9,11667	10,14333	0,90230	0,91380	0,84154
180	3,12333	9,10000	10,08333	0,89751	0,91213	0,83656
210	3,09333	8,97667	10,13333	0,88889	0,89977	0,84071
270	3,11333	9,01000	10,07000	0,89464	0,90311	0,83545
330	3,03667	8,89000	10,03333	0,87261	0,89108	0,83241
390	3,01667	8,79667	10,00000	0,86686	0,88172	0,82965
450	3,03667	8,78667	9,86333	0,87261	0,88072	0,81831
510	2,98333	8,82000	9,87000	0,85728	0,88406	0,81886
570	3,02667	8,76333	9,83000	0,86973	0,87838	0,81554
630	2,98000	8,78000	9,85667	0,85632	0,88005	0,81775
690	2,96000	8,80000	9,80000	0,85057	0,88206	0,81305
750	2,98000	8,80333	9,80333	0,85632	0,88239	0,81333
810	2,98667	8,78333	9,79000	0,85824	0,88039	0,81222
870	3,00667	8,77667	9,81667	0,86398	0,87972	0,81444
930	3,01000	8,76333	9,80333	0,86494	0,87838	0,81333
990	3,02000	8,80333	9,78000	0,86782	0,88239	0,81139
1050	3,01333	8,80000	9,78000	0,86590	0,88206	0,81139
1110	3,01000	8,80000	9,79333	0,86494	0,88206	0,81250
1170	3,00667	8,79333	9,79000	0,86398	0,88139	0,81222
1230	3,00667	8,79667	9,78333	0,86398	0,88172	0,81167
1290	3,00667	8,79667	9,78667	0,86398	0,88172	0,81195
1350	3,00667	8,79667	9,78667	0,86398	0,88172	0,81195
1410	3,00667	8,79667	9,78333	0,86398	0,88172	0,81167

Tabela A.5.3 – Evolução das dimensões da média das amostras dos grãos de milho da variedade 1051 durante a secagem a 65°C.

Tempo (min)	$L_x$ (mm)	$L_y$ (mm)	$L_z$ (mm)	$L_x^*$	$L_y^*$	$L_z^*$
0	3,60333	9,00667	11,40667	1,00000	1,00000	1,00000
10	3,43333	8,87333	11,04000	0,95282	0,98520	0,96786
20	3,41667	8,77667	10,93333	0,94820	0,97446	0,95850
30	3,30000	8,69333	10,73333	0,91582	0,96521	0,94097
40	3,25667	8,69667	10,73667	0,90379	0,96558	0,94126
50	3,14333	8,51667	10,48667	0,87234	0,94560	0,91935
70	3,11667	8,35333	10,28667	0,86494	0,92746	0,90181
90	3,09667	8,14000	10,27667	0,85939	0,90377	0,90094
120	3,07667	8,13000	10,05667	0,85384	0,90266	0,88165
150	3,08333	7,92000	10,02333	0,85569	0,87935	0,87873
180	3,04333	7,90667	10,07333	0,84459	0,87787	0,88311
210	3,02000	7,81000	10,04333	0,83811	0,86714	0,88048
270	3,01333	7,91000	9,99667	0,83626	0,87824	0,87639
330	3,02000	7,84000	9,97000	0,83811	0,87047	0,87405
390	2,98000	7,79667	9,94333	0,82701	0,86566	0,87171
450	2,98000	7,75333	9,91667	0,82701	0,86084	0,86937
510	2,98667	7,68000	9,90333	0,82886	0,85270	0,86821
570	2,98000	7,59000	9,90333	0,82701	0,84271	0,86821
630	2,97000	7,58333	9,87667	0,82424	0,84197	0,86587
690	2,95667	7,58333	9,88333	0,82054	0,84197	0,86645
750	2,95333	7,59000	9,88000	0,81961	0,84271	0,86616
810	2,94667	7,56667	9,89333	0,81776	0,84012	0,86733
870	2,95000	7,56333	9,88667	0,81869	0,83975	0,86674
930	2,95333	7,55667	9,88667	0,81961	0,83901	0,86674
990	2,95000	7,55000	9,87667	0,81869	0,83827	0,86587
1050	2,94333	7,55333	9,87667	0,81684	0,83864	0,86587
1110	2,94333	7,55333	9,86667	0,81684	0,83864	0,86499
1170	2,94333	7,55333	9,86667	0,81684	0,83864	0,86499
1230	2,94333	7,55333	9,86667	0,81684	0,83864	0,86499
1290	2,94000	7,55000	9,86667	0,81591	0,83827	0,86499
1350	2,94000	7,55000	9,86667	0,81591	0,83827	0,86499
1410	2,94000	7,55000	9,86333	0,81591	0,83827	0,86470

Tabela A.5.4 – Evolução das dimensões da média das amostras dos grãos de milho da variedade 1051 durante a secagem a 75°C.

Tempo (min)	$L_x$ (mm)	$L_y$ (mm)	$L_z$ (mm)	$L_x^*$	$L_y^*$	$L_z^*$
0	3,29333	8,87333	10,00333	1,00000	1,00000	1,00000
10	3,11000	8,70333	9,80000	0,94433	0,98084	0,97967
20	3,07333	8,65000	9,74333	0,93320	0,97483	0,97401
30	3,12000	8,53333	9,68333	0,94737	0,96168	0,96801
40	3,08333	8,33667	9,56667	0,93623	0,93952	0,95635
50	3,08667	8,23333	9,50667	0,93725	0,92787	0,95035
70	2,97667	8,18333	9,31333	0,90385	0,92224	0,93102
90	2,91333	7,75333	9,02333	0,88462	0,87378	0,90203
120	2,94667	7,66000	8,85667	0,89474	0,86326	0,88537
150	2,93667	7,58333	8,85333	0,89170	0,85462	0,88504
180	2,95000	7,48667	8,87667	0,89575	0,84373	0,88737
210	2,92000	7,44333	8,93000	0,88664	0,83884	0,89270
270	2,82667	7,41333	8,83667	0,85830	0,83546	0,88337
330	2,87667	7,38000	8,87667	0,87348	0,83171	0,88737
390	2,89000	7,41000	8,83667	0,87753	0,83509	0,88337
450	2,91333	7,43667	8,86000	0,88462	0,83809	0,88570
510	2,91333	7,41667	8,82667	0,88462	0,83584	0,88237
570	2,92667	7,41000	8,83000	0,88866	0,83509	0,88271
630	2,92667	7,42000	8,83667	0,88866	0,83621	0,88337
690	2,92667	7,43000	8,84000	0,88866	0,83734	0,88371
750	2,93333	7,43000	8,84000	0,89069	0,83734	0,88371
810	2,94000	7,43333	8,86000	0,89271	0,83772	0,88570
870	2,93333	7,43333	8,86000	0,89069	0,83772	0,88570
930	2,93333	7,43333	8,85333	0,89069	0,83772	0,88504
990	2,93667	7,43000	8,85667	0,89170	0,83734	0,88537
1050	2,92667	7,43333	8,86000	0,88866	0,83772	0,88570
1110	2,92667	7,43333	8,52333	0,88866	0,83772	0,85205
1170	2,92667	7,43000	8,52000	0,88866	0,83734	0,85172
1230	2,92667	7,43000	8,52333	0,88866	0,83734	0,85205
1290	2,92667	7,43000	8,52333	0,88866	0,83734	0,85205
1350	2,92667	7,43000	8,52333	0,88866	0,83734	0,85205
1410	2,92667	7,43000	8,52333	0,88866	0,83734	0,85205